



اندازه‌گیری و ارائه معادله نیمه تجربی سرعت شعله آرام سوخت ترکیبی متان و ایزواکتان

مهدی بالو¹، بیژن ملایی²، مهدی اخلاقی³، مصطفی میرسلیم⁴

¹ شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، تهران، ایران m.baloo@aut.ac.ir

² دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران dariani@aut.ac.ir

³ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران makhlaji@aut.ac.ir

⁴ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران m_mirsalim@csr.ir

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: 30 آذر 1394

پذیرش: 29 بهمن 1394

کلیدواژه‌ها:

سوخت ترکیبی

سرعت شعله آرام

روش نوری شلیبرین

طول مارک اشتاین

چکیده

استفاده از سوخت‌های ترکیبی از موضوعات مهم در صنعت خودرو است که چند سال اخیر مورد توجه زیاد پژوهشگران این حوزه قرار گرفته است. استفاده از قابلیت‌های بالقوه هر یک از سوخت‌های پایه در یک سوخت ترکیبی موجب هم‌افزایی و بهبود عملکرد احتراق موتور خواهد شد. در این تحقیق، سرعت شعله آرام (به‌عنوان یک خاصیت ذاتی مخلوط اشتعال پذیر) سوخت متان (سوخت پایه گاز طبیعی) و ایزواکتان (سوخت پایه بنزین) و ترکیب آنها، بررسی شد. با استفاده از روش فشار جزئی در تعیین غنای مخلوط، ایزواکتان و متان (با کسرهای مولی 70% و 95% در سوخت ترکیبی) به محفظه حجم ثابت در دماهای 368، 408 و 448 کلوین و فشار 1، 2.5 و 5.5 بار تزریق شدند و بعد از ورود هوا و ایجاد جرقه در مرکز محفظه، از مراحل انتشار شعله کروی به روش نوری شلیبرین عکسبرداری شد. سپس با پردازش تصاویر، سرعت شعله آرام و طول مارک اشتاین استخراج شد. برای شبیه‌سازی عددی سرعت شعله آرام، از الگوی شعله تخت یک بعدی پیش مخلوط در نرم‌افزار کمکین و با سازوکار سینتیکی توسعه داده شده برای مخلوط متان و ایزواکتان استفاده شد و با نتایج آزمون‌های تجربی مقایسه شدند. بعد از شبیه‌سازی عددی معادله همبسته (نیمه تجربی) برای محاسبه سرعت شعله سوخت ترکیبی که تابعی از دما، فشار، غنا و نسبت جرمی متان در سوخت ترکیبی باشد ارائه شد. استفاده از این معادله، دقت بسیار خوبی در تخمین سرعت شعله آرام سوخت ترکیبی در دما و فشار و نسبت جرمی های مختلف دارد.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.



1- مقدمه

با توسعه روزافزون صنعت خودروسازی و افزایش تعداد خودروهای در حال تردد، نیاز به سوختی بهتر و با آلودگی کمتر، بیشتر نمایان می‌شود. از دیر باز سوخت‌های سنگوارهای بویژه بنزین و نفت گاز، سهم عمده‌ای در تأمین نیروی محرکه خودرو داشته‌اند. اما چندی است بحث استفاده از گاز طبیعی به شکل‌های مختلف مورد توجه متخصصان قرار گرفته است. از مهمترین دلایل توجه مهندسان و متخصصان (بخصوص) ایرانی به استفاده از گاز طبیعی را می‌توان، به وجود حوزه‌های وسیع گاز و در نتیجه ارزانتر بودن سوخت، بالا بودن عدد اکتان (مقاومت بیشتر در مقابل کوبش) و کاهش برخی از آلاینده‌های دود نسبت به سایر سوخت‌ها مانند بنزین و گازوییل اشاره کرد.

گاز طبیعی بر خلاف بنزین فاقد گوگرد است و دود حاصل از سوختن آن، عاری از اکسید گوگرد است. مقدار مونواکسیدکربن آن نیز بسیار کمتر از سخت‌ترین استانداردهای موجود در آمریکا و اروپاست. در خودروی گازسوز به علت کاهش قابل ملاحظه رسوبات کربن و آلاینده‌های خروجی، روغن موتور و صافی آن نسبت به سوخت بنزین تمیز تر باقی می‌ماند و تعدد تعویض آنها و در نتیجه هزینه عملیاتی نیز کاهش می‌یابد. گاز طبیعی فشرده از گازهای مختلفی تشکیل شده است که بیش از 80 درصد آن را متان تشکیل می‌دهد و بقیه گازها شامل هیدروکربن‌های فرعی مانند اتان (1 تا 8 درصد)، پروپان (تا 2 درصد) و بوتان و پنتان (کمتر از 1 درصد) و گازهای دیگر مانند نیتروژن و دی‌اکسید کربن است.

برای به‌کارگیری گاز طبیعی به عنوان سوخت خودرو باید آن را در جایگاه سوخت‌گیری تا فشار 200 تا 220 بار ممتراکم نمود که در چنین فشاری چگالی انرژی حجمی گاز طبیعی یک چهارم بنزین است و در نتیجه خودرو مجهز به موتوری با سوخت گاز طبیعی فشرده، با حجم مخزن گاز معادل با حجم مخزن بنزین، چهار برابر یک خودرو بنزینی برای همان مسافت نیاز به مراجعه به جایگاه سوخت‌گیری دارد و می‌توان نتیجه گرفت که برد عملیاتی خودروهای با سوخت بنزین بر مراتب بیشتر از خودروی با سوخت گاز طبیعی فشرده شده است. البته محدود بودن تعداد جایگاه‌های عرضه سوخت گاز طبیعی در کشور نیز مسئله را تشدید می‌کند.

از طرف دیگر استفاده از بنزین بجای گاز طبیعی در موتورهای خودرو، دارای معایبی از قبیل کمتر بودن عدد اکتان، انتشار آلاینده‌های کربن دار بیشتر، ایجاد رسوبات کربن زیادتر در اطراف دریچه‌ها و شمع و تشکیل ترکیبات مضر سلامتی و محیط زیست است. به نظر می‌رسد با تزریق سوخت گاز و بنزین به طور همزمان در موتور اشتعال جرقه‌ای، بتوان از مزایای دو سوخت در کنار هم بهره برد. البته در موتورهای پرخوران¹ که هوا با فشار داخل استوانه موتور می‌شود، مزایای استفاده

از سوخت ترکیبی بیشتر نمایان می‌شود، زیرا از یک طرف افت بازده تنفسی (قابلیت هوارسانی به موتور) ناشی از تزریق گاز در راهگاه ورودی، با سامانه پرخوران جبران می‌شود؛ از طرف دیگر به علت افزایش مقاومت به کوبش² سوخت ترکیبی گاز و بنزین، موتور در نقطه بهینه جرقه‌زنی کار می‌کند و در نتیجه مصرف سوخت و آلاینده‌ها بیشتر کاهش می‌یابد. بکارگیری مخلوط گاز و بنزین به عنوان سوخت جایگزین، در سال 2008 توسط مونیر³ ثبت شده است [1].

اصل اساسی مطرح شده، تزریق سوخت گازی با چگالی انرژی کم و عدد اکتان بالا (برای مثال گاز طبیعی فشرده) در ترکیب با تزریق سوخت مایع با چگالی انرژی زیاد و عدد اکتان پایین (برای مثال بنزین) بود.

در زمینه استفاده از سوخت ترکیبی گاز و بنزین در موتورهای اشتعال جرقه‌ای، بخصوص در موتورهای پرخوران، در سال‌های اخیر کارهای زیادی انجام و نتایج در مجلات معتبر منتشر شده است. از میان این کارها می‌توان به کار دلپچ و همکاران [2] در سال 2010 اشاره نمود. آنها آزمون‌های موتوری را با استفاده از تزریق همزمان گاز طبیعی و بنزین در موتور پرخوران که با تغییراتی بویژه افزایش نسبت تراکم ساخته شد، انجام دادند. افزایش بازده تنفسی و بازده احتراقی با حفظ خاصیت ضد کوبشی متان، عملکرد موتور با نسبت هم ارزی (غنا) یک، حتی در حالت بار کامل و هزینه پائین از نتایج کار آنها بود.

اوبیولس و همکاران [3] در سال 2011 با استفاده از سوخت ترکیبی گاز و بنزین در موتور پرخوران تزریق مستقیم (گاز طبیعی به صورت تزریق در راهگاه ورودی و بنزین به صورت تزریق مستقیم) به بررسی عملکرد موتور با نسبت هم ارزی یک در حالت بار کامل پرداختند. افزایش فشار متوسط مؤثر ترمزی نسبت به سوخت تکی (گاز یا بنزین)، استفاده از گاز طبیعی به عنوان تقویت کننده اکتان بنزین و عمر بیشتر افشانه بنزین و کاهش آلاینده هیدروکربنی از نتایج کار آنها بود.

در همین راستا در سال 2014 در مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو (ایپکو)، تزریق همزمان سوخت گاز و بنزین در موتور ملی پرخوران (EF7TC) بررسی شد [4]. کاهش مصرف سوخت ویژه ترمزی و آلاینده های CO و HC نسبت به حالت بنزینی و کاهش بیشینه فشار استوانه و انتقال حرارت به سیال خنک کننده نسبت به سوخت گازی از دستاوردهای این تحقیق بود.

با توجه به موارد ذکر شده و نتایج خوبی که آزمون‌های موتوری در تحقیقات یاد شده به همراه داشته است، می‌توان نتیجه گرفت افزودن گاز طبیعی به بنزین قابلیت‌های مناسبی را در موتور اشتعال جرقه‌ای ایجاد می‌کند. در همین راستا شبیه‌سازی احتراق این سوخت ترکیبی برای بهینه سازی موتور، نیاز به دانستن کمیت‌های پایه‌ای مانند سرعت شعله آرام⁴ دارد که در مراجع به آن اشاره ای نشده است.

³ Monnier

⁴ Laminar flame speed

¹ Turbocharged or super- charged

² knock

2. اهمیت سرعت شعله آرام

بدون شک اصلی ترین موضوع مورد بحث در موتورهای احتراق داخلی، فرآیند احتراق است. یکی از مباحثی که در توسعه احتراق موتورهای احتراق داخلی مطرح است، نرخ سوختن⁵ مخلوط است که به طور کامل از چگونگی انتشار⁶ شعله مخلوط درون محفظه احتراق تأثیر می پذیرد و در کارایی موتور احتراق داخلی تأثیرگذار است.

به عنوان مثال در موتور اشتعال جرقه ای⁷، هر چه نرخ سوختن بیشتر باشد، قابلیت دستیابی به احتراق در حجم ثابت و در نتیجه بازده حرارتی بهتر، افزایش می یابد. چگونگی و نرخ انتشار شعله به عواملی چون ترکیب مخلوط سوخت و هوا، غنا، گازهای باقیمانده، دما و فشار مخلوط، حرکت مخلوط در محفظه احتراق، شکل محفظه احتراق و محل قرارگیری شمع بستگی دارد [5].

برای تعریف سرعت شعله مغشوش الگوهای زیادی ارائه شده است. در برخی از این الگوها نظریه اصلی این است که اغتشاش باعث چروکیدگی شعله می شود و سطح جناح شعله را زیاد می کند [6]. بنابراین با استفاده از قانون بقای جرم که نشان دهنده ارتباط سطح شعله با سرعت آن است، معادله (1) به دست می آید که در آن S_L و S_T بترتیب سرعت شعله آشفته و آرام و A_T و A_L بترتیب سطح جناح شعله آشفته و آرام اند:

$$\frac{S_T}{S_L} = \frac{A_T}{A_L} \quad (1)$$

در برخی از الگوها، ارتباط سرعت شعله مغشوش و آرام به شکل معادله (2) بیان شده است [7]:

$$\frac{S_T}{S_L} = 1 + c \frac{u \phi}{\bar{c} S_L} \quad (2)$$

که در آن c یک ثابت است و $u \phi$ سرعت نوسانی نسبت به مقدار متوسط سرعت است.

بنابراین شبیه سازی احتراق مغشوش نیاز به دانستن مقادیر سرعت شعله آرام دارد. همچنین تعیین دقیق سرعت شعله آرام بر حسب دما و فشار، در توسعه و صحنه گذاری سازوکارهای⁸ سینتیکی احتراق سوختها اهمیت دارد. در ساز و کار سینتیکی، واکنشهای محتمل و گونه های شیمیایی⁹ که در طی احتراق تشکیل می شوند، وجود دارد؛ هر چه این سازوکارها دقیق تر باشند، پیش بینی آلاینده ها بهتر خواهد بود. نتایج سرعت شعله آرام مخلوط متان و ایزواکتان پایگاه داده خوبی برای توسعه سازوکارهای سینتیکی مفصل و کاهش یافته برای شبیه سازی احتراق سوخت ترکیبی متان و ایزواکتان خواهد بود.

3. سرعت شعله آرام سوخت ترکیبی

بروستیل¹⁰ و همکاران [8] بوتانول و اتانول (سوخت های الکلی) را بطور جداگانه با سه نسبت حجمی به ایزواکتان اضافه کردند و سرعت شعله آرام و طول مارک اشتاین¹¹ را در محفظه حجم ثابت و با فشارهای اولیه مختلف در دمای 423 K اندازه گرفتند. در نهایت آنها معادله هایی برای سرعت شعله آرام سوخت ترکیبی که تابعی از نسبت هم ارزی، دما، فشار و غلظت الکل بود ارائه دادند.

در کاری مشابه، واری¹² و همکاران [9]، بطور تجربی اثر فشار، نسبت هم ارزی و کسر مولی اتانول را بر سرعت شعله آرام سوخت ترکیبی ایزواکتان - اتانول بررسی کردند و معادله کلی برای محاسبه سرعت شعله آرام در دمای 373 K استخراج کردند.

تیان¹³ و همکاران [10]، درباره سرعت شعله آرام سوخت ترکیبی ایزواکتان و DMF (2 و 5 دی متیل فوران) تحقیق کردند. آنها نتیجه گرفتند که مقادیر سرعت شعله و طول مارک اشتاین سوخت ترکیبی در بین مقادیر سوخت های پایه قرار می گیرد.

چن¹⁴ و همکاران [11]، معادله نظری برای سرعت شعله سوخت های ترکیبی دوتایی ارائه کردند. در این معادله، سرعت شعله آرام سوخت ترکیبی دوتایی، متناسب با مجذور سرعت شعله هر یک از سوختها است.

در مورد تأثیر افزودن سوخت های مختلف به متان نیز تحقیقات زیادی انجام شده است که بیشتر آن راجع به افزودن هیدروژن به متان است. سرعت شعله هیدروژن نسبت به سوخت های هیدروکربنی خیلی زیادتر است؛ از طرفی متان کمترین سرعت شعله را در میان سوخت های هیدروکربنی هم خانواده دارد. لذا افزودن کمی سوخت هیدروژن به متان می تواند سرعت شعله آن را زیاد کند و سوخت ترکیبی نهایی که نهایت¹⁵ نامیده می شود، خصوصیات احتراقی مناسبی داشته باشد [12]. اثر مهم افزودن هیدروژن به متان افزایش نرخ سوختن صفر تا ده درصد جرمی مخلوط سوخت و هوا، بدون اثرگذاری قابل توجه در ده تا نود درصد جرمی مخلوط است [13, 14]. در این محدوده، احتراق بیشتر به صورت آرام است و عدم احتراق¹⁶ در برخی از چرخه های موتوری در همین بازه اتفاق می افتد.

در تحقیقی دیگر سرعت شعله آرام سوخت ترکیبی متان - دی متیل اتر اندازه گیری شد و مشاهده شد، سرعت شعله آرام سوخت ترکیبی، در بین سرعت شعله سوخت های متان و دی متیل اتر قرار می گیرد [15]. در حوزه اندازه گیری سرعت شعله آرام، روش های مختلفی وجود دارد و در پنجاه سال اخیر توجه زیادی به توسعه روش های جدید و بهبود

¹¹ Markstien length

¹² varea

¹³ Tian

¹⁴ Chen

¹⁵ Hytene

¹⁶ Misfiring

⁵ burning rate

⁶ Propagation

⁷ Spark Ignition (SI)

⁸ Mechanism

⁹ Chemical species

¹⁰ Broustail

تأمین می‌شود و دود حاصل از احتراق نیز از همین مسیر به سمت بیرون خارج می‌شود. سه حسگر فشار (PT1, PT2, PT3) در این مسیر وجود دارد و عملیات تنظیم فشار با این حسگرها صورت می‌گیرد. حسگر فشار اول (PT1)، فشار خلاء ایجاد شده با تلمبه خلاء²⁷ در محفظه را اندازه می‌گیرد.

تحریک افشانه‌ها، الکتروود جرقه‌زن، شروع فیلمبرداری و ثبت فشار دینامیکی با واحد مدیریت برقی²⁸ انجام می‌شود. مخازن سوخت مایع²⁹ و گازی³⁰ که در قسمت راست چیدمان نشان داده شده است، در بیرون از اتاق آزمون تعبیه شده‌اند. آزمون‌ها در هر نقطه حداقل 2 مرتبه تکرار می‌شوند.

جدول 1 فهرست سوخت‌های خالص و ترکیبی را نشان می‌دهد. دماها و فشارهای آزمون‌ها به ترتیب 368، 408 و 448 کلوبین و 1، 2,5 و 5,5 بار انتخاب شد.

جدول 1: سوخت‌های خالص و ترکیبی در آزمون‌ها

سوخت	نسبت هم ارزی (ϕ)	درصد جرمی متان در سوخت ترکیبی	درصد مولی متان در سوخت ترکیبی
متان	0,85-1,2	1	1
(M70)	0,85-1,2	0,24	0,7
(M95)	0,85-1,2	0,72	0,95
ایزواکتان	0,85-1,2	0	0

5. اندازه‌گیری تجربی سرعت شعله در روش حجم ثابت

شکل (2) شرایط گازهای سوخته و نسوخته را در یک شعله آرام یک بعدی تحت صفحه‌ای نشان می‌دهد که به صورت آزادانه در یک مجرای طولانی با سطح مقطع ثابت انتشار می‌یابد. در چهار چوب ثابت، (جناح شعله (موج احتراقی) به سمت چپ حرکت می‌کند).

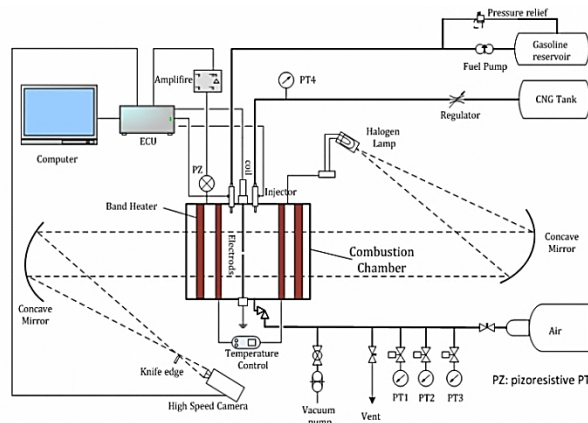
اگر جناح شعله به عنوان چهارچوب مرجع در نظر گرفته شود، گازهای نسوخته با سرعت به آن نزدیک می‌شوند و گازهای سوخته شده با سرعت شعله را ترک می‌کنند. u نماینده مخلوط نسوخته و b نماینده مخلوط سوخته است.

روش‌های قبلی برای تعیین نظری و آزمایشگاهی سرعت شعله آرام شده است.

شیوه‌های مختلف آزمایشگاهی که در مراجع [16] و [17] مرور شده است، شامل انتشار شعله کروی به سمت بیرون، شعله متقابل یا شعله ایستا، مشعل بونسن و شعله تخت پایدار شده‌اند که برای اندازه‌گیری سرعت شعله توسعه داده شده‌اند.

4. آزمون تجربی و روش عکسبرداری شیلیرین

Error! Reference source not found. چیدمان آزمون اندازه‌گیری سرعت شعله آرام را نشان می‌دهد. محفظه احتراق¹⁷ استوانه‌ای شکل در مرکز چیدمان دیده می‌شود. دو افشانه¹⁸، دو سیم فولادی جرقه زن، سیم پیچ¹⁹، حسگر فشار مطلق، چهار گرمکن برقی کمربندی²⁰ و دماسنج بر روی آن تعبیه شده است.



شکل 1: طرح واره ای از چیدمان آزمون

نور از منبع نور²¹ به سمت آینه کروی اول²² در سمت راست هدایت می‌شوند و بعد از عبور از محفظه احتراق به آینه کروی دوم در سمت چپ برخورد می‌کند. نور انعکاس یافته از این آینه پس از عبور از لبه چاقویی²³ وارد دوربین سریع می‌شود. سرعت عکسبرداری آن در بیشینه قدرت تفکیک²⁴ 512×512 خانه²⁵، 2500 عکس در ثانیه²⁶ است که با افزایش سرعت عکسبرداری قدرت تفکیک عکس‌ها کاهش خواهد یافت. در تصویر برداری شعله آرام در آزمون‌ها، از سرعت عکسبرداری 4000 تصویر در ثانیه و قدرت تفکیک 308×328 استفاده شده است که با توجه به کارهای مشابه مرور شده، مقدار مناسبی است. از خط لوله‌های که زیر محفظه کشیده شده است هوای مورد نیاز محفظه

²⁴ Resolution

²⁵ Pixel

²⁶ Frames per second

²⁷ Vacuum Pump

²⁸ ECU

²⁹ Gasoline Reservoir

³⁰ CNG Tank

¹⁷ Combustion Chamber

¹⁸ Injector

¹⁹ Coil

²⁰ Band Heater

²¹ Halogen lamp

²² Concave Mirror

²³ Knife edge

$$a = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{2}{r_f} \frac{dr_f}{dt} \quad (7)$$

که $A = 4\pi r_f^2$ سطح جناح شعله است. نرخ کشیدگی شعله ریشه در نرخ کرنش و انحنا شعله دارد [20,19].

در شعله‌هایی که کشیدگی زیادی ندارند یک معادله خطی بین سرعت شعله کشیده شده نسبت به گاز سوخته (S_b)، سرعت شعله کشیده نشده نسبت به گاز سوخته (S_b^0) و نرخ کشیدگی وجود دارد که با طول مارک اشتاین³² (L_b) مشخص می‌شود [18]:

$$S_b = S_b^0 - L_b a \quad (8)$$

در نهایت سرعت شعله کشیده نشده نسبت به گاز سوخته (سرعت شعله آرام) از معادله (9) حاصل می‌شود:

$$S_u^0 = s \quad S_b^0 \quad (9)$$

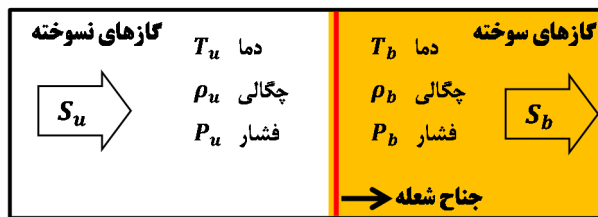
کلی³³ و لا [21] نشان دادند که استفاده از روش برونیایی خطی در به دست آوردن S_b^0 در برخی موارد (مانند مخلوط‌های خیلی رقیق یا خیلی غنی) نتایج دقیقی نمی‌دهد. به همین خاطر معادله غیرخطی (10) از جانب آنها پیشنهاد شد که در شرایط اولیه و نسبت هم ارزی‌های مختلف از یک سوخت از دقت خوبی برخوردار است که در این تحقیق هم از این معادله استفاده شد:

$$\frac{\frac{\partial S_b}{\partial S_b^0} \frac{\partial S_b^0}{\partial S_b^0} \ln \frac{\partial S_b}{\partial S_b^0} \frac{\partial S_b^0}{\partial S_b^0}}{\frac{\partial S_b}{\partial S_b^0} \frac{\partial S_b^0}{\partial S_b^0}} = -2 \frac{L_b a}{S_b^0} \quad (10)$$

6. شبیه‌سازی عددی

در این تحقیق، شبیه‌سازی سرعت شعله آرام با استفاده از نرم‌افزار کمکین³⁴، بسته نرم‌افزاری سینتیک شیمیایی به زبان فرترن، انجام گرفته است. برای شبیه‌سازی شعله تخت یک بعدی آرام، جریان سوخت و هوا با شار جرمی ثابت $0.04 \frac{gr}{cm^2.s}$ وارد فضای محاسباتی که یک خط است، می‌شود.

طول مسیر برای عبور این جریان 0.3 cm در نظر گرفته شد. با توجه به شرایط دمایی و فشاری، واکنش‌های احتراقی در میانه مسیر شروع می‌شوند و دمای شعله زیاد می‌شود تا به بیشینه خود برسد و تمام سوخت وارد شده مصرف شود (شکل 3). تعداد نقاط اولیه شبکه 6 عدد است که به صورت تطابقی³⁵ این تعداد با توجه به گرادین‌های حل، زیادتر می‌شوند تا به تعداد نقاط بیشینه مجاز تعریف شده (300 عدد) برسند. معادلات پیوستگی، بقای گونه‌ها، انرژی و حالت با شرایط مرزی داده شده در این فضای محاسباتی حل می‌شوند. روش گام زمانی مجازی³⁶ که روش مناسبی برای حل دائمی معادلات مشتقات جزئی وابسته به زمان است، برای حل معادلات در نظر گرفته می‌شود. در این روش تعداد گام زمانی اولیه و مقدار آن داده شده و با افزایش و یا کاهش



شکل 2: شعله آرام یک بعدی تخت صفحه ای

چون شعله با سرعت مادون صوت حرکت می‌کند (deflagration) فشار P_u و P_b یکسان اند. سطح شعله ثابت است و در گذر از جناح شعله، چگالی از ρ_u به ρ_b کاهش می‌یابد. بنابراین با نوشتن معادله پیوستگی، سرعت گاز سوخته و نسوخته به یکدیگر وصل می‌شوند [7]:

$$S_b Ar_b = S_u Ar_u \quad (3)$$

$$\frac{S_u}{S_b} = \frac{r_b}{r_u} = s \quad (4)$$

که r_u و r_b به ترتیب چگالی گاز سوخته و نسوخته و A سطح جناح شعله می‌باشند. نسبت این دو با σ بیان شده است. از این نسبت در محاسبه سرعت شعله آرام استفاده می‌شود.

در شعله‌ای که داخل محفظه به صورت کروی رشد می‌کند، اثرات کشیدگی شعله حایز اهمیت است و اصلاحات راجع به آن در محاسبه سرعت شعله آرام (سرعت شعله بدون کشیدگی)³¹ باید به دقت لحاظ شود. نرخ رشد شعله (یا سرعت انتشار) کروی پیش مخلوط که به سمت بیرون بزرگ می‌شود، نرخ افزایش شعاع شعله نسبت به زمان است که از معادله (5) به دست می‌آید:

$$\frac{dr_f}{dt} = S_b + U_b \quad (5)$$

که در این معادله r_f شعاع لحظه‌ای، t زمان و S_b سرعت جناح شعله نسبت به مخلوط سوخته شعاع است که به آن سرعت شعله کشیده شده هم گفته می‌شود. U_b سرعت مطلق جریان گاز سوخته در جلوی جناح شعله است.

در تمامی کارهای انجام شده با استفاده از روش فشار ثابت، داده‌برداری در محدوده فشار تقریباً ثابت می‌باشند و فرض می‌شود که گازهای سوخته تقریباً ساکن می‌باشند ($U_b \gg 0$). در نتیجه معادله (5) بدین شکل درمی‌آید:

$$\frac{dr_f}{dt} = S_b \quad (6)$$

باید دقت شود S_u و S_b که به ترتیب سرعت شعله آرام نسبت به گاز سوخته و نسوخته می‌باشند با فرض کشیدگی ناچیز جناح شعله به دست آمده‌اند. در شعله کروی که شعاع آن از مرکز به سمت بیرون بزرگ می‌شود نرخ کشیدگی (a) از معادله (7) به دست می‌آید [18]:

³⁴ Chemkin

³⁵ Adaptive

³⁶ Pseudo time-stepping

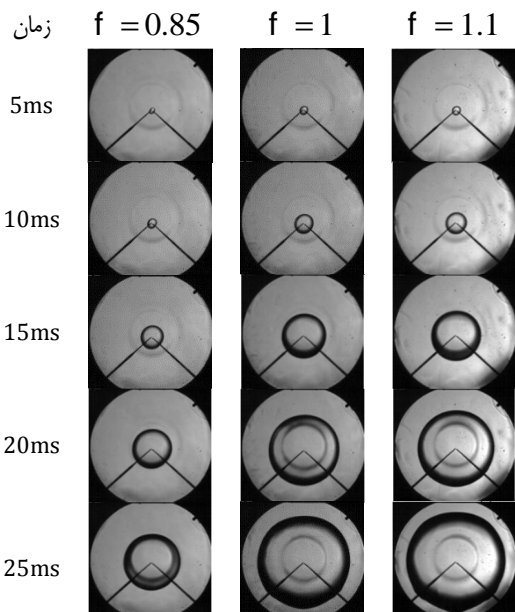
³¹ Unstretched flame speed

³² Markstein Length

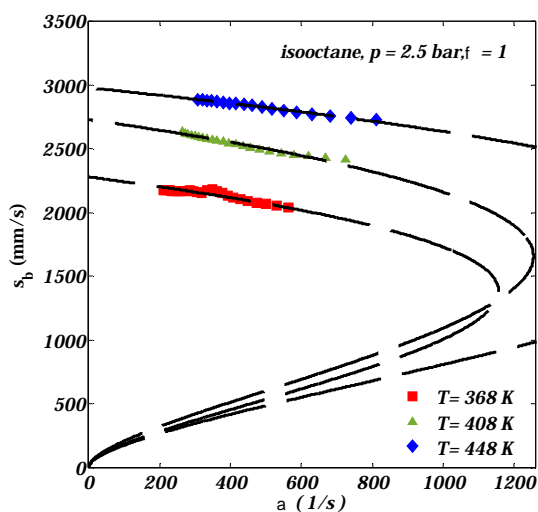
³³ Kelley

با استفاده از برونمایی غیرخطی با عبور دادن معادله (10) از نقاط رسم شده در نمودار $(s_b - a)$ ، طول مارک اشتاین سوخته (L_b) و S_b^0 حاصل می شود که یک نمونه از آن در شکل 5 به صورت خط چین آمده است.

مقایسه سرعت شعله آرام M70 در آزمون تجربی با نتایج به دست آمده از شبیه سازی با استفاده از سازوکار سینتیکی MIS در شکل 6 نشان داده شده است. حداکثر خطای این دور روش در حدود 7% است که با توجه به دقت سازوکارهای سینتیکی مقدار مناسبی است.



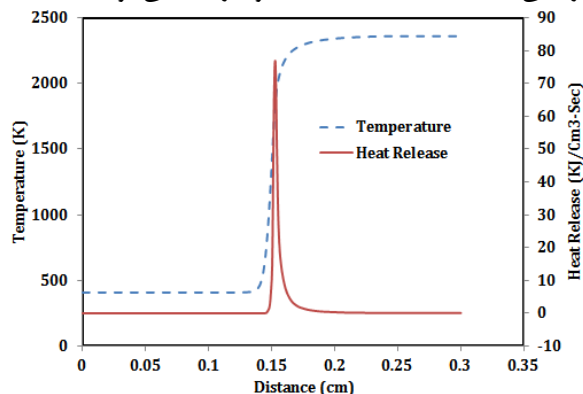
شکل 4: انتشار شعله کروی در غناهای مختلف با سوخت ترکیبی متان- ایزواکتان (M70)



شکل 5: برونمایی غیرخطی برای به دست آوردن S_b^0 با سوخت ایزواکتان در غنای $f = 1$

این تعداد، حل نهایی با همگرایی سریعتر و با دقت بیشتر حاصل می شود.

شکل 3 نمونه ای از حل کمکین برای محاسبه سرعت شعله سوخت ترکیبی متان- ایزواکتان در $T = 408 K$ ، $P = 5.5 bar$ و مخلوط درست $(\phi = 1)$ را نشان می دهد. همانطور که مشخص است، طول میدان حل 0.3 cm در نظر گرفته شده است و حرارت آزاد شده و دما در نزدیکی $x = 0.15 cm$ به بیشینه خود نزدیک می شود.



شکل 3: نمونه ای از حل کمکین برای محاسبه سرعت شعله مخلوط درست سوخت و هوا با سوخت ترکیبی متان- ایزواکتان در $P=5.5 bar$ و $T=408 K$

برای سوخت مخلوط متان و ایزواکتان با توجه به اینکه تا کنون برای این سوخت ترکیبی، سازوکار سینتیکی ارائه نشده است، لازم بود سازوکار مناسبی انتخاب می شد. یکی از روش های ایجاد سازوکار برای سوخت ترکیبی، استفاده از سازوکارهای سوخت های پایه و ادغام کردن این سازوکارها در قالب یک سازوکار جامع است که امروزه با توسعه نرم افزارهای جدید این کار امکان پذیر شده است. سازوکار مورد نظر با ترکیب ساز و کار GRI3.0 (متان) و SK143 [22] (ایزواکتان) و حذف واکنش های تکراری با استفاده از نرم افزار CHEMKIN و استخراج شد. دقت این سازوکار نیز از طریق آزمون های تجربی اندازه گیری سرعت شعله بررسی شد. سازوکار نهایی حاصل شده، MIS نامیده شد و در بردارنده 856 واکنش شیمیایی اصلی به همراه 169 جزء شیمیایی است. بعد از اطمینان از نتایج استفاده از ساز و کار MIS با مقایسه با نتایج تجربی سرعت شعله با ترکیب سوخت های مختلف و دما و فشار مختلف، در کلیه شبیه سازی های عددی از این سازوکار استفاده شد.

7. بحث و بررسی نتایج عددی و تجربی

نمونه ای از تصاویر ثبت شده با فاصله زمانی 5 میلی ثانیه که با سوخت ترکیبی M70 گرفته شده است، در شکل 4 نشان داده شده است. نرخ افزایش شعاع در $\phi = 1.1$ بیشترین و در $\phi = 0.85$ کمترین است.

$$a = a_1 + a_2 f + a_3 f^2 + a_4 f^3 + a_5 f^4$$

$$b = b_1 + b_2 f + b_3 f^2 + b_4 f^3 + b_5 f^4$$

$$S_{L,0} = c_1 + c_2 f + c_3 f^2$$

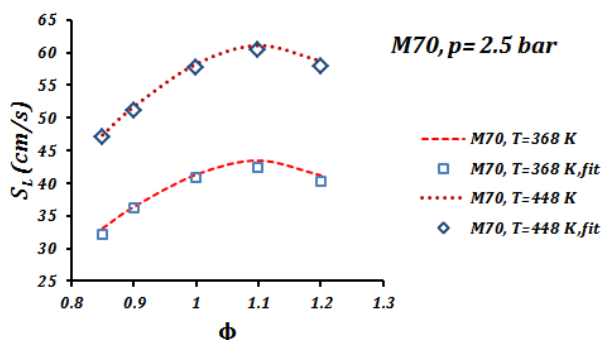
$$S_L = S_{L,0} \frac{\alpha_u}{\alpha} \frac{\rho}{\rho_0} \frac{p}{p_0} \frac{\dot{m}}{\dot{m}_0}$$

$$S_{L,blend}^0(f, P_u, T_u) = \exp\left[\frac{\alpha}{\beta} \ln(S_{L,CH_4}^0(f, P_u, T_u)) + \frac{\alpha}{\beta} \ln(S_{L,C_8H_{18}}^0(f, P_u, T_u))\right] \quad (14)$$

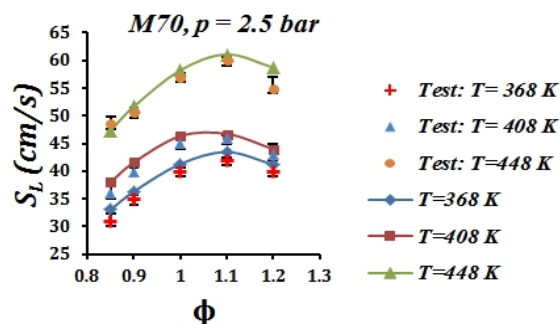
نتایج به دست آمده در فشار بیشتر در شکل (9)، هم حاکی از دقت معادله همبسته در پیش بینی سرعت شعله آرام سوخت ترکیبی است.

جدول 2: ضرایب ثابت حاصل شده در معادله (14)

ضرایب	ایزواکتان	متان
a ₁	54.85	869.7
a ₂	-210.5	-3372
a ₃	312.8	4897
a ₄	-206.6	-3153
a ₅	51.14	759.8
b ₁	-10.64	-129.3
b ₂	41.14	498.2
b ₃	-61.53	-720.1
b ₄	41.11	461.6
b ₅	-10.34	-110.7
c ₁	-145.8	-213
c ₂	352.6	512.4
c ₃	-154.1	-244.1



شکل 7: مقایسه نمودارهای سرعت شعله آرام سوخت ترکیبی (M70) با استفاده از معادله همبسته (14) (نشانه) و روش عددی (خطچین) در دماهای $T = 368$ و 448 K و فشار $P = 2.5$ bar



شکل 6: مقایسه سرعت شعله آرام M70 با نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با استفاده از سازوکار سینتیکی MIS

8. توسعه معادله همبسته برای سرعت شعله مخلوط متان و ایزواکتان

بسیاری از معادله‌های مورد استفاده برای بیان سرعت شعله آرام بی‌رو، از اندازه‌گیری‌هایی که متقارن، کک و رودس با محفظه احتراق کرووی انجام دادند، اقتباس شده است که به شکل معادله (11) اند [23]:

$$S_L = S_{L,0} \frac{\alpha_u}{\alpha} \frac{\rho}{\rho_0} \frac{p}{p_0} \frac{\dot{m}}{\dot{m}_0} \quad (11)$$

که در آن $S_{L,0}$ ، α ، β ، متغیرهایی هستند که برای مخلوط سوخت و هوا با غنای مشخص، محاسبه می‌شوند:

$$b = -0.16 + 0.22(f - 1) \quad (12)$$

سرعت شعله آرام در نقطه مرجع با فشار $P_0 = 1$ atm و $T_0 = 298$ K است.

واری و همکاران [24] برای سوخت ترکیبی اتانول و ایزواکتان، از نسبت مولی سوخت‌های پایه استفاده کردند:

$$S_{L,blend}^0(f, P_u) = \exp\left[\frac{\alpha}{\beta} \ln(S_{L,C_8H_{18}}^0(f, P_u)) + \frac{\alpha}{\beta} \ln(S_{L,ethanol}^0(f, P_u))\right] \quad (13)$$

در این تحقیق ابتدا با الهام از الگوی متقارن و کک (معادله (11))، معادله سرعت شعله سوخت‌های خالص متان و ایزواکتان در دما و فشار مرجع جدید $T = 368$ K و $P = 1$ bar حاصل شد. سپس ضرایب ثابت جدید بر طبق معادلات معادله (12) و با استفاده از داده‌های آزمون شبیه‌سازی به دست آمده و در جدول 2 نوشته شده است. معادله نهایی برای سوخت ترکیبی متان و ایزواکتان هم از معادله (14) که برای واری و همکاران اقتباس شده است. در این معادله، بجای کسر مولی از کسر جرمی استفاده شد. نمونه‌ای از نتایج حاصل شده با استفاده از معادله نیمه تجربی توسعه یافته در شکل‌های 6 و 7 نشان داده شده است. حداکثر اختلاف بین نتایج عددی و نتایج حاصل از معادله همبسته در حدود 4% است.

فهرست علائم

r	شعاع لحظه‌ای
A	مساحت، m^2
S	سرعت شعله، cm/s
t	زمان، s
T	دما، K
U	سرعت مطلق جریان، cm/s
Y	کسر جرمی
P	فشار، bar
L	طول مارک اشتاین

علائم یونانی

e	نسبت مولی
a, b	ضرایب ثابت
ϕ	نسبت هم ارزی
α	نرخ کشیدگی، $1/s$

زیر نویس‌ها

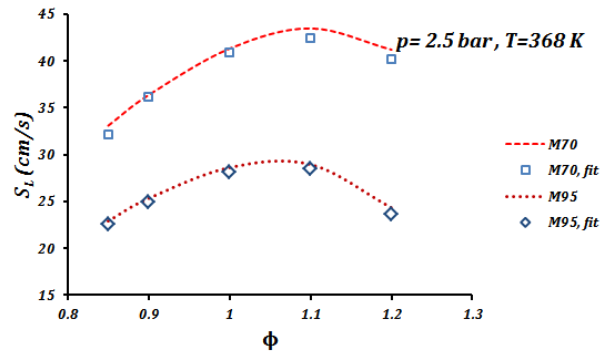
f	شعله
T	مغشوش
b	سوخته
u	نسوخته
L	آرام (لایه‌ای)
L, O	نقطه مرجع

بالانویس‌ها

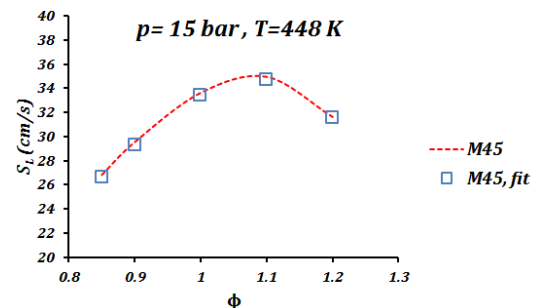
O	شرایط مرجع
-----	------------

مراجع

- [1] G. Monnier, *Method for controlling the operation of an engine with a single-fuel or multiple-fuel injection mode*. 2008, Google Patents
- [2] V. Delpech, et al., Towards an Innovative Combination of Natural Gas and Liquid Fuel Injection in Spark Ignition Engines, SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 3 196-209, 2010
- [3] J. Obiols, et al., *Potential of Concomitant Injection of CNG and Gasoline on a 1.6L Gasoline Direct Injection Turbocharged Engine*, S.T. Paper, and Editor, 2011
- [4] M. Movahed, H.B. Tabrizi, and M. Mirsalim, Experimental investigation of the concomitant injection of gasoline and CNG in a turbocharged spark ignition engine, Energy Conversion and Management, 80, 126-136, 2014



شکل 8: مقایسه نمودارهای سرعت شعله آرام سوخت ترکیبی (M70) و (M95) با استفاده از رابطه همبسته (14) (نشانه) و روش عددی (خط چین) در دمای $T = 368 \text{ K}$ و فشار $P = 2.5 \text{ bar}$



شکل 9: مقایسه نمودارهای سرعت شعله آرام سوخت ترکیبی (M45) با استفاده از رابطه همبسته (14) (نشانه) و روش عددی (خط چین) در دمای $T = 448 \text{ K}$ و فشار $P = 15 \text{ bar}$

9. نتیجه گیری

در این پژوهش، با استفاده از محفظه حجم ثابت و آماده سازی مخلوط سوخت و هوا با غنای مختلف با استفاده از روش فشار جزئی، سرعت شعله آرام در دماها و فشارهای مختلف اندازه‌گیری می‌شود. رابطه نیمه تجربی ارائه شده است. محاسبه سرعت شعله آرام سوخت ترکیبی، با الهام از تحقیقات گذشته در اندازه‌گیری سرعت شعله آرام سوخت‌های خالص و ترکیبی داده شده است. این معادله با محاسبه سرعت شعله سوخت‌های پایه (متان و ایزواکتان)، با دقت بسیار خوبی سرعت شعله آرام سوخت‌های ترکیبی را تخمین می‌زند. در صورت دانستن سرعت شعله سوخت‌های مرجع، رابطه نهایی می‌تواند برای ترکیب‌های مختلف و در دما، فشارهای دیگر استفاده شود.

تشکر و قدردانی

این مقاله در راستای پایان نامه دکتری تعریف شده در مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو (ایپکو) و با حمایت مالی و معنوی این شرکت نوشته شده است. لازم است در اینجا از آقایان مهندس کرباسیفر و شهما، مهندس محسنی راد، دکتر چیت ساز و همه عزیزانی که در آماده‌سازی و انجام آزمون‌ها، مساعدت فکری و عملی نمودند، تشکر و قدردانی شود.

- to methane-air mixtures, Proceedings of the Combustion Institute, 31 (2007) 1215-1222
- [16] Andrews, G. and D. Bradley, Determination of burning velocities: a critical review, Combustion and Flame, 18 (1972) 133-153
- [17] Rallis, C.J. and A.M. Garforth, The determination of laminar burning velocity, Progress in Energy and Combustion Science, 6 (1980) 303-329
- [18] Clavin, P., Dynamic behavior of premixed flame fronts in laminar and turbulent flows, Progress in Energy and Combustion Science, 11 (1985)
- [19] Bradley, D., P. Gaskell, and X. Gu, Burning velocities, Markstein lengths, and flame quenching for spherical methane-air flames: a computational study, Combustion and Flame, 104 (1996) 176-198
- [20] Groot, G., et al., The effects of strain and curvature on the mass burning rate of premixed laminar flames, Combustion Theory and Modeling, 6 (2002) 675-695
- [21] Kelley, A. and C. Law. Nonlinear effects in the experimental determination of laminar flame properties from stretched flames. In Eastern State Fall Technical Meeting Chemical & Physical Processes in Combustion. 2007
- [22] Yoo, C.S., et al., A DNS study of ignition characteristics of a lean iso-octane/air mixture under HCCI and SACI conditions, Proceedings of the Combustion Institute, 34 (2013) 2985-2993
- [23] Metghalchi, M. and J. Keck, Laminar burning velocity of propane-air mixtures at high temperature and pressure, Combustion and flame, 38 (1980) 143-154
- [24] Varea, E., et al., Pressure effects on laminar burning velocities and Markstein lengths for isooctane-ethanol-air mixtures, Proceedings of the Combustion Institute, 34 (2013)
- [5] J.A. Gatowski, J.B. Heywood, and C. Deleplace, Flame photographs in a spark-ignition engine, Combustion and Flame, 56, 71-81, 1984
- [6] T. Poinso, and D. Veynante, Theoretical and numerical combustion. 2005: RT Edwards, Inc
- [7] Turns, S.R., An introduction to combustion. 2nd, Boston: McGraw Hill, (2000)
- [8] G. Broustail et al., Experimental determination of laminar burning velocity for Butanol/iso-octane and ethanol/iso-octane blends for different initial pressures, Fuel, 106 (2013) 310-317
- [9] E. Varea et al., Pressure effects on laminar burning velocities and Markstein lengths for isooctane-ethanol-air mixtures, Proceedings of the Combustion Institute, 34 (2013) 735
- [10] Tian, G., et al., Laminar burning velocities of 2, 5-dimethylfuran compared with ethanol and gasoline, Energy & Fuels, 24 (2010) 3898-3905
- [11] Chen, Z., P. Dai, and S. Chen, A model for the laminar flame speed of binary fuel blends and its application to methane/hydrogen mixtures, international journal of hydrogen energy, 37 (2012) 10390-10396
- [12] Coppens, F., J. De Ruyck, and A. Konnov, The effects of composition on burning velocity and nitric oxide formation in laminar premixed flames of CH₄+H₂+O₂+N₂, Combustion and Flame, 149 (2007) 409-417
- [13] Brower, M., et al., Ignition delay time and laminar flame speed calculations for natural gas/hydrogen blends at elevated pressures, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 135 (2013) 021504
- [14] Goldwitz, J.A., Combustion optimization in a hydrogen-enhanced lean burn SI engine. 2004, Massachusetts Institute of Technology
- [15] Chen, Z., et al., High temperature ignition and combustion enhancement by dimethyl ether addition



Laminar flame speed measurement and correlation for methane-iso-octane fuel blend

M. Baloo¹, B. Mollaei*², M. Akhlaghi³, M. Mirsalim⁴

¹*Irankhodro Powertrain Company, Tehran, Iran, m.baloo@aut.ac.ir*

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

³*Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, makhlagi@aut.ac.ir*

⁴*Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, m_mirsalim@csr.ir*

**Corresponding Author*

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 20 December 2015

Accepted: 17 February 2016

Keywords:

blended fuel

laminar flame speed

Schlieren method

Markstein length

ABSTRACT

Nowadays, utilization of blended fuel in internal combustion engine is one of main topics in vehicle industries. The synergy effect will be highlighted when the potential of each fuel is employed and the engine performance will improve consequently. In this research, the laminar flame speed of methane (main component of reference fuel for Natural gas) and isooctane (main component of reference fuel for gasoline) and their blended fuel, as an intrinsic characteristic of combustible mixtures is measured. Isooctane and methane with two volumetric fractions of 70% and 95% in blended are added in constant volume combustion chamber with partial pressure method in three temperature of 368, 408 and 448K and three pressure of 1, 2.5 and 5 bar. After filling the chamber in specified fuel air ratio, the mixture is ignited at the center of chamber and flame propagation is recorded with schlieren method. Laminar flame speed and Markstein length are calculated via post processing of flame images. Numerical simulation of flame speed is done using CHEMKIN code. Finally, a correlation based on temperature, pressure, equivalence ratio and methane mass fraction in blended fuel is proposed which predict the flame speed well.

