

## مطالعه تجربی سرعت سوزش آرام مخلوط دو سوخت (گاز طبیعی-بنزین) با هوا در محفظه حرارتی کرووی با فشار اولیه بالا

ابراهیم عبدی اقدم<sup>۱\*</sup>، مهرداد سرابی<sup>۲</sup> و مجتبی مهرداد خمیرانی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، eaaghdam@uma.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، m.sarabi67@gmail.com

۳- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۶/۸/۱۶، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۶/۹/۳۰، پذیرش: ۹۶/۱۰/۱۳)

**چکیده:** سرعت سوزش متلاطم مخلوط سوخت و هوا به سرعت سوزش آرام آن بستگی دارد. دما، فشار، نسبت هم‌ارزی ( $\phi$ ) و نوع سوخت از فاکتورهای اساسی سرعت سوزش آرام‌اند. در کار حاضر، برای روشن شدن تاثیر ترکیب دو سوخت بنزین و گاز طبیعی در گستره فشار ۵ تا ۲۰ بار، روی سرعت سوزش آرام، داده‌های تجربی فشار-زمان در طول فرایند احتراق از محفظه حرارتی کرووی حجم ثابت به همراه تعلیقات مربوطه استخراج شده و برای محاسبه سرعت سوزش آرام از روی این داده‌ها از کد ترمودینامیکی چندمنطقه‌ای بهره برده شده است. در طول دوره احتراق سرعت سوزش آرام مخلوط بنزین-هوا و گاز طبیعی-هوا در نسبت هم‌ارزی استوکیومتری و همچنین سرعت سوزش مخلوط‌های گاز طبیعی-بنزین و هوا با درصدهای جرمی گاز طبیعی ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ و فشار و دمای اولیه به ترتیب ۵۰۰ kPa و ۳۳۳ K برآورد شد. نتایج حاصل از مخلوط بنزین-هوا در مقایسه با گاز طبیعی-هوا نشان داد که سرعت سوزش آرام گاز طبیعی، در رنج ۵ تا ۲۰ بار، بیشتر از بنزین است. همچنین، با استفاده از ترکیب گاز طبیعی و بنزین، مشاهده شد که در فشارهای کمتر از ۲۰ بار، سرعت سوزش تحت شرایط حاکم برای حالت‌های ۲۵٪ و ۵۰٪ جرمی گاز طبیعی کمتر از ۱۰٪ گاز طبیعی است.

**کلیدواژگان:** سرعت سوزش آرام، محفظه حجم ثابت، گاز طبیعی، بنزین، مخلوط دو سوخت

### مقدمه

مبحث انرژی و منابع مختلف تهیه آن جزء چالش‌های اصلی محققان شاخه انرژی است. از طرفی، کاهش منابع سوخت فسیلی و نگرانی‌های زیست‌محیطی، پژوهشگران را بر این داشته که به دنبال یافتن راه‌کارهایی برای بهینه‌سازی مصرف سوخت باشند. گاز طبیعی یکی از منابع عظیم انرژی در ایران است که به دلیل پاک و اقتصادی بودن آن می‌تواند به‌عنوان سوخت اصلی در خودروها به کار گرفته شود.

استفاده از گاز طبیعی در موتورهای احتراقی دارای محاسن فراوانی است که می‌توان به چند مورد از آن‌ها مانند طبیعت گازی برای اختلاط آسان با هوا، اقتصادی بودن و عدد اکتان بالا، که امکان افزایش نسبت تراکم و در نتیجه افزایش بازده موتور را فراهم می‌کند، اشاره کرد. از طرف دیگر، استفاده از گاز طبیعی با معایبی همراه است که می‌توان به سنگینی مخازن ذخیره گاز، وجود ناخالصی‌ها و چگالی و جرم مولکولی پایین آن تاکید کرد. از این رو، به نظر می‌رسد، با استفاده هم‌زمان از مخلوط گاز طبیعی و بنزین، بتوان از محاسن دو سوخت بهره‌مند شد و معایب آن‌ها را تقلیل داد.

امروزه، به‌طور گسترده از روش‌های مختلف برای تعیین سرعت سوزش استفاده می‌شود. محاسبه سرعت سوزش، با توجه به ساختمان محفظه احتراق و فنون اندازه‌گیری، در میدان جریان حاکم تعیین می‌شود. روش‌های مختلفی برای تعیین سرعت

سوزش آرام براساس داده‌های تجربی وجود دارد [۱]. در اغلب پژوهش‌های تجربی، بر روی سرعت سوزش آرام از محفظه احتراقی حجم ثابت با شرایط اولیه قابل تنظیم استفاده می‌کنند [۲-۶]. دو روش نوری و فشاری در پژوهش‌های پیشین مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۷].

سرعت سوزش یکی از خواص مهم مخلوط قابل اشتعال سوخت-هواست، که به‌صورت حرکت جبهه شعله در جهت عمود بر سطح خود در میان گازهای نسوخته تعریف می‌شود. همچنین، می‌توان سرعت سوزش را آهنگ انتشار موج احتراق در میان مخلوط اشتعال‌پذیر گازی تعریف کرد [۸]. سرعت سوزش متلاطم بستگی به سرعت سوزش آرام<sup>۱</sup> و مشخصه‌های تلاطم جریان داشته و همچنین سرعت سوزش آرام تابعی از نوع سوخت، کیفیت مخلوط و خواص ترمودینامیکی آن است. از آنجا که در آغاز فرایند احتراق موتورهای اشتعال‌جرقه‌ای با پیشروی شعله، فشار و دمای مخلوط سوخت و هوا در حال افزایش است، تعیین سرعت سوزش آرام در فشارها و دماهای بالا اهمیت بیشتری به‌خود می‌گیرد.

متقالچی و کک [۹] به‌صورت تجربی سرعت سوزش آرام مخلوط‌های هوا با سوخت‌های مختلف در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۸ تا ۱/۵، بازه فشار ۰/۴ تا ۵۰ بار، بازه دمای ۲۹۸ تا ۷۰۰ کلوین و کسر جرمی رقیق‌کننده صفر تا ۰/۲ را اندازه‌گیری کردند. میترا و کومار [۱۰]، احتراق مخلوط هوا و متان در یک محفظه حجم ثابت را مطالعه کردند. آن‌ها افزایش فشار گذرا، دمای گذرا، شعاع گاز سوخته‌شده و سرعت سوزش در دما و فشار اولیه مختلف و همچنین، ترکیب مخلوط متفاوت را محاسبه و رابطه همبستگی برای سرعت سوزش آرام به‌صورت تابعی از فشار و دمای اولیه و نسبت هم‌ارزی را به‌دست آوردند که برای محدوده وسیعی از مخلوط‌هوا-متان اعتبار دارد.

مندیلایس و همکاران [۱۱] اثر افزودن ۵ درصد هیدروژن به مخلوط‌های پیش‌آمیخته متان و ایزواکتان با هوا را در حالت ورقه‌ای و متلاطم در شرایط فشار ۵ bar و نسبت‌های هم‌ارزی مختلف بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که سرعت سوزش آرام  $U_f$  برای مخلوط رقیق و استوکیومتریک متان-هیدروژن در مقایسه با متان خالص افزایش می‌یابد و برای  $\phi \geq 1/2$ ، افزایشی در سرعت سوزش اتفاق نمی‌افتد. همچنین، مخلوط‌های ایزواکتان-هیدروژن خیلی سریع‌تر از مخلوط خالص ایزواکتان و هوا، در تمام گستره نسبت هم‌ارزی، می‌سوزد.

برادلی و همکاران [۱۲] سرعت سوزش آرام ( $U_f$ )، مخلوط هیدروژن-هوا را از اندازه‌گیری سرعت‌های شعله در یک محفظه حرارتی کروی با احتراق مرکزی به‌دست آوردند. آزمایش آن‌ها در محدوده فشار ۰/۱ تا ۱ MPa با مقادیر نسبت هم‌ارزی بین ۱ تا ۰/۳ بود. با افزایش سرعت شعله، شعله‌ها سریع‌تر ناپایدار شدند که این به‌علت ناپایداری ترمودیفیوز<sup>۲</sup> است و این اثر با افزایش فشار زیاد می‌شود. به‌وجود آمدن چین‌خوردگی در شعله به‌علت ناپایداری، سرعت شعله را زیاد می‌کند.

جرزمیک و همکارانش [۱۳] شعله‌های کروی مخلوط‌های نرمال هپتان، ایزواکتان، PRF87<sup>۳</sup> و بنزین-هوا را برای به‌دست آوردن سرعت سوزش آرام در یک محفظه حرارتی کروی حجم‌ثابت مطالعه کردند. آن‌ها آزمایش‌های خود را در شرایط دمای اولیه ۳۷۳ K، نسبت‌های هم‌ارزی متغیر از  $\phi = 0.7$  تا  $1/2$  و فشار اولیه از ۱۰ تا ۲۵ bar انجام دادند. همچنین، برای مشاهده جبهه شعله از روش عکس‌برداری شلیرن<sup>۴</sup> و تصویربرداری دیجیتال استفاده کردند.

ارژبانگ‌هو و همکارانش [۲] سرعت سوزش آرام و شروع ناپایداری سلولی شعله‌های مخلوط متان-هیدروژن-هوا را با استفاده از یک محفظه حرارتی استوانه‌ای در فشارها و دماهای بالا بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که سرعت انتشار شعله و سرعت سوزش آرام با افزایش دمای اولیه و کسر هیدروژن، افزایش و با افزایش فشار اولیه، کاهش می‌یابد. همچنین، مشاهده کردند که ناپایداری شعله حساسیت بیشتری با تغییرات فشار اولیه در مقایسه با دمای اولیه دارد.

1. laminar Burning Velocity

2. Thermo diffusive

3. Primary Reference Fuel consisting of 87% iso-octane and 13% n-heptane

4. Schlieren

هایان میائو و همکارانش [۱۴] سرعت سوزش آرام مخلوط گاز طبیعی-هیدروژن-هوا را با پیش مخلوط نیتروژن رقیق شده به وسیله تصویربرداری شلیرن در فشارهای اولیه، با کسرهای مختلف مولی هیدروژن و با نسبت‌های رقیق‌کننده مختلف با استفاده از یک محفظه حرارتی استوانه‌ای حجم ثابت، به دست آوردند. آن‌ها نشان دادند که عموماً سرعت سوزش با افزایش فشار اولیه و همچنین نسبت رقیق‌کننده کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش نسبت رقیق‌کننده، سرعت سوزش بدون در نظر گرفتن تغییرات فشار اولیه کاهش می‌یابد. همچنین، دیده شد، با افزایش فشار اولیه و کسر هیدروژن، پایداری شعله کاهش یافته و با افزایش گاز رقیق‌کننده، شعله به پایداری بیشتر میل می‌کند.

عبدی‌ا قدم و حسینی‌اصل [۱۵] یک مطالعه تجربی بر روی سرعت سوزش آرام گاز طبیعی، در گستره دمای اولیه ۳۰۰ تا ۳۶۰K و گستره فشار اولیه ۳ تا ۷/۵ bar در یک محفظه گرمایی کرووی انجام داده و به کمک کد شبیه‌ساز احتراق ترمودینامیکی دو منطقه‌ای سرعت سوزش آرام در طول دوره احتراق بر حسب فشار محفظه را به دست آوردند.

عبدی‌ا قدم [۱۶] اثر دیواره محفظه کرووی حجم ثابت روی سرعت سوزش آرام مخلوط ایزواکتان-هوا را در اشتعال مرکزی مخلوط آرام بررسی کرد. او برای برآورد سرعت سوزش از داده‌های فشار ثبت شده در طول احتراق و یک مدل شبیه‌ساز ترمودینامیکی شبه‌ابعادی<sup>۱</sup> چندمنطقه‌ای با فرض رشد کرووی شعله از مرکز و ناچیزبودن انتقال گرما به دیواره استفاده کرد. وی از سرعت سوزش آرام برآورد شده بر حسب شعاع شعله مشاهده کرد که از حدود دو میلی‌متر مانده به دیواره، سرعت برآوردی تقلیل جدی می‌یابد و نتیجه‌گیری کرد که احتمالاً، با برخورد موضعی جبهه شعله به دیواره، سطح فعال شعله تقلیل یافته و انتقال گرما به دیواره جدی می‌شود و سرعت سوزش آرام با مفروضات بالا در بخش انتهایی فرایند سوزش، به علت نزدیکی جبهه شعله به دیواره محفظه، قابل اعتماد نیست. او، همچنین، با تغییر تعداد منطقه سوخته، نتیجه گرفت که وقتی تعداد منطقه بیشتر می‌شود، تغییراتی در توزیع دما با وقوع قله در مرکز اتفاق می‌افتد، اما تاثیر تعداد منطقه مفروض روی سرعت سوزش برآوردی ناچیز است.

بالو و همکاران [۱۷] سرعت سوزش آرام و ناپایداری شعله مخلوط متان و ایزواکتان را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزودن متان به ایزواکتان سرعت گسترش بدون کشیدگی شعله در بازه فقیرسوز افزایش، اما، این سرعت در منطقه غنی کاهش یافت. آنها، همچنین، نشان دادند که سرعت سوزش آرام در ۳۰ درصد حجمی متان بسیار نزدیک به سرعت سوزش آرام ایزواکتان بوده و در حالت ۷۰ درصد حجمی متان، سرعت سوزش آرام بیشتر از سرعت سوزش آرام متان در نسبت هم ارزی ۰/۹ حاصل شد. بررسی آن‌ها در دمای ۳۶۳K و فشار ۱bar و نسبت‌های هم ارزی ۰/۸۵ تا ۱/۲ انجام گرفته است.

پتراکیدس و همکاران [۱۸] سرعت سوزش آرام مخلوط بنزین و گاز طبیعی را در حالت استوکیومتری با سه نسبت انرژی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد گاز طبیعی به بنزین بررسی کردند. آن‌ها آزمایش‌های خود را در فشارهای ۲/۵، ۵ و ۱۰bar در دمای ۳۷۳K داده و نشان دادند که با افزایش ۲۵ درصدی گام نسبت انرژی سوخت گاز طبیعی به بنزین در فشارهای مورد اشاره سرعت سوزش آرام ترکیبی سوز به ترتیب حدود ۲، ۳ و ۵ درصد نسبت به حالت بنزین سوز کاهش و همچنین، با افزایش فشار از ۲/۵bar تا ۱۰bar، سرعت سوزش آرام تمامی نسبت‌های سوخت ترکیبی سوز و سوخت‌های خالص، به طور قابل ملاحظه‌ای، کاهش می‌یابد.

با استفاده از روش فیلم‌برداری سریع رشد شعله، بالو و همکاران [۱۹]، در یک تحقیق نیمه تجربی بر روی مخلوط سوخت متان و ایزواکتان در محفظه حرارتی حجم ثابت، سرعت سوزش آرام را در فشار اولیه ۱bar و دمای اولیه ۳۶۸K تخمین زدند. سپس، رابطه‌ای را برای مخلوط متان-ایزواکتان پیشنهاد دادند.

برای حالت‌های ترکیبی سوز اتانول و بوتانول-ایزواکتان و متان-ایزواکتان روابط مختلفی در ادبیات فن پیشنهاد شده است که با جزئیات بیشتر از منابع مربوطه قابل بررسی‌اند [۱۹-۲۱].

استخراج نتایج تجربی سرعت سوزش در فشارها و دماهای بالا به روش فیلم‌برداری سریع کار بسیار دشوار و گاهی با تکنولوژی و روش‌های موجود غیرممکن است. از طرفی، احتراق واقعی در فضای کاربردی مثل موتورهای احتراق داخلی گاهی در شرایط گذرای فشار و دما بالا رخ می‌دهد و بررسی نظری احتراق در موتورهای احتراقی سرعت سوزش در شرایط فشار بالا را می‌طلبد. در کار حاضر، با استفاده از محفظه حرارتی کرووی و روش فشار مینا، ضمن تایید روش کار برای مخلوط بنزین-هوا، سرعت سوزش مخلوط هوا با سوخت ترکیبی گازطبیعی-بنزین در دماها و فشارهای بالا استخراج شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

### تشریح مدل شبیه‌ساز ترمودینامیکی برای برآورد سرعت سوزش

از انواع مدل‌های احتراق می‌توان به مدل ترمودینامیکی، مدل تک‌منطقه‌ای، مدل دو منطقه‌ای و مدل چندمنطقه‌ای اشاره کرد که در این پژوهش از مدل چندمنطقه‌ای ترمودینامیکی با به‌کارگیری تحلیل ترمودینامیکی داده‌های تجربی فشار-زمان استفاده شده است [۱۶]. مفروضات زیر در مدل ترمودینامیکی لحاظ شده است:

- جرم و حجم کل محفظه در طول احتراق ثابت است.
  - تمامی گازهای موجود در محفظه‌ی احتراق ایدئال فرض می‌شوند.
  - محفظه احتراق کرووی و رشد شعله از مرکز به‌صورت کرووی است.
  - فشار به‌طور فضایی در هر آن از طول احتراق یکنواخت است.
  - فرایند تراکم ناحیه نسوخته و نواحی سوخته در گام‌های قبلی آیزنتروپیک است.
  - از انتقال گرما بین نواحی سوخته و نسوخته و همچنین از انتقال گرما به دیواره محفظه در طول احتراق صرف‌نظر می‌شود، لذا انرژی داخلی محفظه ثابت می‌ماند.
  - گاز نسوخته، در ابتدا، به‌طور یکنواخت، ساکن است و در طول احتراق ساختمان شعله غیریکنواخت و رژیم جریان ورقه‌ای است.
  - از تاثیر غیرهمگنی احتمالی ناشی از جاذبه ثقلی روی مخلوط صرف‌نظر می‌شود.
- در این پژوهش، ابتدا مقادیر فشار و دمای مخلوط اولیه، نسبت هم‌ارزی ( $\phi$ )، حجم کل محفظه، فرکانس داده‌برداری، ضرایب مورد نیاز برای محاسبه گرمای ویژه، آنتالپی و آنتروپی گونه‌ها به‌همراه داده‌های تجربی فشار-زمان ثبت شده از محفظه حرارتی (به‌کمک حسگرهای فشار در طول احتراق) به‌عنوان ورودی به مدل ترمودینامیکی در نظر گرفته می‌شود. سپس، برای گام فشار معین اولیه، مقدار جرم بخش سوخته، با سعی و خطا، به‌کمک مفروضات بالا، اصل بقای جرم، قوانین اول و دوم ترمودینامیک و تعادل شیمیایی برای مناطق سوخته برآورد می‌شود و به‌عنوان مبنای شروع محاسبات اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. وقتی تغییرات فشار محفظه با فرکانس معینی ثبت می‌شود این تغییرات برحسب زمان در دسترس قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه در طول احتراق تغییرات فشار با زمان ترجیحاً خطی نیست برای گام‌های معین فشار، گام زمانهای مربوطه می‌تواند متفاوت ظاهر شود. با انتخاب گام فشار محاسباتی معین، گام زمان مربوطه از روی داده‌های ورودی تعیین و با رعایت مفروضات فوق به‌روش سعی و خطا مقدار حجم و جرم سوخته طی گام محاسبه و سرعت سوزش تعیین می‌شود. از اثرات هیدرودینامیک و ترموآکوستیک روی سطح شعله صرف‌نظر شده است.

روابط به‌دست‌آمده از مفروضات مربوط به مدل ترمودینامیکی به‌طور دیفرانسیلی در مرجع [۱۶] آمده است. در کار حاضر، محاسبات به‌صورت گام‌به‌گام، با رعایت مفروضات مدل، انجام گرفت. در انتهای هر گام سه قسمت کلی قابل تشخیص است: منطقه نسوخته، ناحیه در حال سوزش در گام جاری و قسمت از قبل سوخته که می‌تواند با رشد شعله در طول احتراق چند منطقه باشد. در راستای رعایت مفروضات مدل، مانند بقای جرم، بقای انرژی، بقای حجم محفظه، یکنواختی فشار در هر آن،

رفتار گاز ایدئال مناطق و تعادل شیمیایی برای نواحی که سوخته یا می‌سوزد، فرایندهای پشت‌سرهم ترمودینامیکی زیر در نظر گرفته شد تا مقدار جرم سوخته در هر گام محاسباتی فشار ( $\Delta p$ ) حاصل شود:

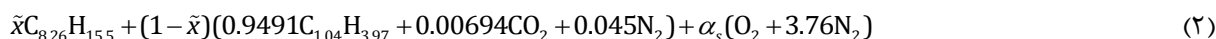
- فرایند تراکم آیزنتروپیک یا آنتروپی ثابت منطقه سوخته و تعادل شیمیایی مناطق سوخته در طول گام (این فرایند سبب کاهش حجم مناطق و افزایش دمای آنها می‌شود).
  - حدس مقدار جرمی از گاز سوخته که طی گام می‌سوزد و برآورد حجم آن از چگالی گاز سوخته
  - فرض فرایند احتراق در فشار ثابت در تعادل برای جرم حدسی و محاسبه حجم آن
  - کنترل بقای حجم گاز داخل محفظه، در صورت عدم احراز اصلاح جرم حدسی متناسب با نتایج به‌دست‌آمده، و تکرار فرایند محاسبات تا اینکه با دقت کافی مقدار جرم سوخته در گام مورد نظر برآورد شود.
- جرم سوخته در ابتدای گام، حجمی را به‌صورت سوخته در تماس با ناحیه سوخته از قبل کروی داشته است. ضخامت شعاعی آن حجم،  $\Delta r$ ، برآورد می‌شود و سرعت سوزش از رابطه (۱) تعیین می‌شود.

$$u_i = \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (1)$$

که در آن  $\Delta t$  گام زمانی مربوط به گام فشار  $\Delta p$  است و از روی داده‌های تجربی  $p-t$  تعیین می‌شود.

### مخلوط هوا با دو سوخت بنزین و گاز طبیعی

در این بررسی، فرمول شیمیایی متوسط بنزین با استناد به مرجع [۲۲]  $C_{8.26}H_{15.5}$  با جرم مولکولی متوسط  $114/8 \text{ kg/kmol}$  و چگالی  $\rho = 739/m^3$  در نظر گرفته شد. ترکیب گاز طبیعی، با استعلام از شرکت گاز در اردبیل، به شرح جدول ۱ برپایه درصد حجمی گونه‌ها مشخص شد که از آن جرم مولکولی متوسط  $17/178 \text{ kg/kmol}$  برای گاز طبیعی حاصل می‌شود. حدود  $94/91$  درصد از ترکیب گاز طبیعی مربوط به هیدروکربن‌هاست و مابقی به‌صورت ناخالصی به  $CO_2$  و  $N_2$  مربوط می‌شود. برای بخش هیدروکربن، با استفاده از اصل بقای عنصر و ترکیب موجود، به‌سادگی، می‌توان فرمول شیمیایی متوسط  $C_{1.04}H_{3.97}$  را به‌دست آورد. با این فرض که برای گاز طبیعی کسر حجمی را می‌توان به‌صورت کسر مولی نیز به‌کار گرفت، رابطه استوکیومتری مخلوط هوا با سوخت ترکیبی بنزین و گاز طبیعی را می‌توان به‌صورت رابطه (۲) بیان کرد.



که در آن  $\tilde{x}$  کسر مولی بنزین در سوخت ترکیبی و  $\alpha_s$  تعداد مول‌های اکسیژن لازم در مخلوط استوکیومتری برای هر مول سوخت ترکیبی است. با استفاده از جرم‌های مولکولی بنزین ( $M_{Gas.}$ ) و گاز طبیعی ( $M_{NG}$ )، رابطه بین کسرهای مولی و جرمی ( $x, \tilde{x}$ ) بنزین در سوخت ترکیبی را می‌توان به‌صورت رابطه (۳) به‌دست آورد:

$$\tilde{x} = \frac{x}{(1-x)\frac{M_{Gas.}}{M_{NG}} + x} \quad (3)$$

پس از برآورد تعداد مول مخلوط سوخت ترکیبی-هوا می‌توان در شرایط اولیه  $T_i$  و  $P_i$  و حجم محفظه  $V_b$  از رابطه گاز ایدئال به‌کمک رابطه (۲) می‌توان به تعداد مول‌های هر یک از سوخت‌ها و فشارهای جزئی آن‌ها در مخلوط دست یافت. از فشارهای جزئی گاز طبیعی می‌توان در شارژ آن به محفظه و از تعداد مول سوخت بنزین در برآورد جرم و حجم آن به فرم مایع استفاده کرد.

با استفاده از روابط (۲) و (۳) و فرض معادل بودن کسر فشار گونه با کسر مولی آن، فشارهای جزئی بنزین و گاز طبیعی و مقدار جرم آن‌ها برای درصد ترکیب‌های مختلف محاسبه شد، که در جدول ۲ جمع‌بندی شده است.

جدول ۱- اجزای سازنده گاز طبیعی در شهرستان اردبیل

Table 1- Natural gas constituents in Ardabil city

constituent	Percent
CH <sub>4</sub>	88.323 %
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	4.672 %
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1.137 %
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.484 %
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.181 %
CO <sub>2</sub>	0.694 %
N <sub>2</sub>	4.5 %
H <sub>2</sub> S	0.849 ppm

جدول ۲- مقادیر جرم و فشار جزئی سوختها

Table 2- Mass and partial pressure values of fuels

%Gasoline	%NG	Gasoline partial pressure (kPa)	NG partial pressure (kPa)	Gasoline mass (μL)	NG mass (mg)
100	0	8.477	0	198	0
75	25	6.132	13.015	143	33.55
50	50	3.939	25.510	92	65.77
25	75	1.885	36.547	44	94.22
0	100	0	49.151	0	126.72

برای تعیین نسبت گرماهای ویژه مخلوط گاز ایدئال با استفاده از رابطه  $\bar{R} = \bar{C}_p - \bar{C}_v$  و تعریف گرمای ویژه در فشار ثابت مخلوطی از  $m$  گونه گاز ایدئال به صورت روابط (۴) و (۵) به دست می آید.

$$\bar{C}_{p, Mix}(T) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=0}^6 \bar{x}_j a_{ij} T^i \quad (4)$$

$$\gamma_{mix}(T) = \frac{\bar{C}_{p, mix}(T)}{\bar{C}_{v, mix}(T)} \quad (5)$$

که در آن  $\bar{x}_j$  کسر مولی گونه  $j$ ام، ضرایب چندجمله‌ای و  $T$  دمای گاز برحسب کلوین مخلوط است. آنتالپی ویژه یک مخلوط ایدئال متشکل از  $m$  گونه را می توان با استفاده از رابطه (۶) تعیین کرد و ضرایب چندجمله‌ای گرمای ویژه مخلوطهای سوخت- هوا با ۵ ترکیب مختلف به صورت جدول ۳ است [۲۲-۲۴].

$$\bar{h}_{mix}(T) = \sum_{j=1}^m \bar{x}_j \left[ h_{fj}^0 + \sum_{i=0}^6 \frac{a_{ij}}{i+1} (T^{i+1} - T_R^{i+1}) \right] \quad (6)$$

که در آن  $T_R$  دمای مرجع ۲۹۸K و  $h_{fj}^0$  آنتالپی تشکیل گونه  $j$ ام در دمای  $T_R$  است. عبارت آنتروپی ویژه برای یک مخلوط ایدئال با  $m$  گونه را می توان از مجموع آنتروپی تک تک گونه‌ها، مطابق رابطه (۷)، به دست آورد:

$$\bar{s}_{mix}(T, P) = \sum_{j=1}^m \bar{x}_j \left[ \bar{s}_j^0 - \bar{R} \ln(P_j) + a_{0j} \ln\left(\frac{T}{T_R}\right) + \sum_{i=1}^6 \frac{a_{ij}}{i} (T^i - T_R^i) \right] \quad (7)$$

که در فشار ثابت ۱ bar و دمای  $T_R$  دمای ۲۹۸K است.

جدول ۳- ضرایب چندجمله‌ای گرمای ویژه

Table 3- Specific heat polynomial coefficients

%Gasoline	%NG	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>
100	0	7.666317	-4.598111	23.318290	-36.591343	33.200670	-17.3431	3.985734
75	25	7.648265	-4.855355	21.993810	-31.847509	26.830693	-13.285	2.959626
50	50	7.631534	-5.093764	20.766309	-27.451021	20.927128	-9.52406	2.00865
25	75	7.615986	-5.315333	19.625512	-23.365076	15.440557	-6.02875	1.124846
0	100	7.601498	-5.521786	18.562546	-19.557893	10.328307	-2.77191	0.301339

## تجهیزات استفاده شده

تجهیزات به کاررفته برای داده برداری شامل محفظه کرووی فولادی به حجم  $416\text{cm}^3$  به همراه متعلقات، ترانسدیوسر<sup>۱</sup> فشار دینامیک شرکت کیسلر<sup>۲</sup> مدل 6052C با قابلیت ثبت تا فشار ۲۰۰bar و تحمل حداکثر دمای  $400^\circ\text{C}$  و ترانسدیوسر فشار مطلق کیسلر مدل 4005BA با قابلیت ثبت تا فشار ۲۰bar بوده است. همچنین، برای گرم کردن محفظه حرارتی از گرم کن المنت تسمه‌ای انعطاف پذیر (مجهز به سیستم ترموستات تنظیم دمای خاص خود) روی نیمه پایینی محفظه کرووی استفاده شد و دمای داخل محفظه توسط ترموکوپل نوع k با قطر سیم  $0.5\text{mm}$  تعیین شد. برای رسیدن به نسبت هم‌ارزی و مقدار گاز استفاده شده از یک سیلندر خلا‌ساز دستی با کورس  $25\text{cm}^3$  و قطر  $5\text{cm}$  استفاده شده است. همچنین، احتراق مخلوط توسط سیستم جرقه‌زنی مبتنی بر جریان مستقیم و یک کویل بوده است. مجموعه میز آزمایش مورد استفاده در آزمایشگاه به صورت طر حوره، در شکل ۱، ارائه شده است. برای اندازه‌گیری دقیق مایعات با حجم پایین از سرنگ‌های میکرولیتر، که در مقیاس‌های مختلف قابل دسترس‌اند، استفاده می‌شود. در این پژوهش، از سرنگ میکرولیتر همیلتون برای سنجش و تزریق مقدار معین سوخت مایع به داخل محفظه استفاده شده است.

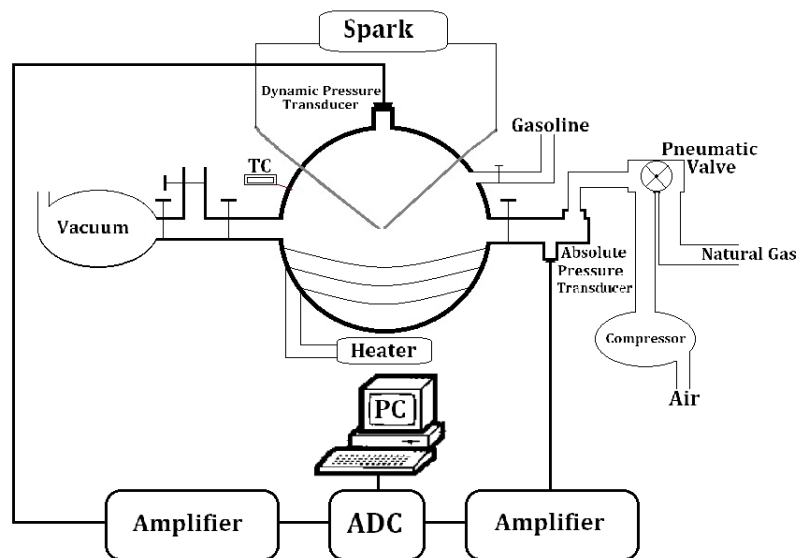


Figure 1- General design of the combustion vessel for determining laminar burning velocity

شکل ۱- طرح کلی محفظه حرارتی برای تعیین سرعت سوزش آرام

## نحوه انجام آزمایش

ابتدا، محفظه حرارتی در فشار محیط تا دمای اولیه مورد نظر گرم شد، سپس، برای اینکه بتوان از گاز طبیعی شهری استفاده کرد، با ایجاد خلا در آن و مجدداً احراز دمای مورد نظر فشار مطلق محفظه ثبت شد. شیر ورودی گاز طبیعی طوری کنترل شد که گاز به آرامی وارد محفظه شود، به طوری که افزایش فشار محفظه در دمای آزمایش معادل با فشار جزئی گاز طبیعی لازم در مخلوط شود. در مرحله بعد، سوخت مایع بنزین برای احراز ترکیب مخلوط به داخل محفظه گرم تزریق شد. در نهایت، با بازکردن شیر هوای فشار قوی، فشار داخل محفظه طوری با دقت کنترل شد تا دما و فشار اولیه آزمایش فراهم شود. پس از

1. Transducer  
2. Kistler  
3. Stroke

آماده شدن مخلوط و انتظار ۱۰ دقیقه‌ای [۲۵]، برای کسب شرایط آرام، سیستم اخذ داده فشارها فعال و با جرقه شمع تغییرات فشار داخل محفظه نسبت به زمان با فرکانس ۱۰kHz ثبت شد. از روش مشابه، در مقالات اخیر، نیز، استفاده شده و رشد کروی شعله از مرکز مشاهده شده است [۲۶، ۲۷].

در کار حاضر، نتایج تجربی تغییرات فشار محفظه برحسب زمان در طول احتراق، مشابه روش تحقیق مرجع [۱۶]، به‌عنوان داده ورودی برای کد شبیه‌ساز ترمودینامیکی به‌کار گرفته شده است. توضیح این نکته لازم است که صحت‌سنجی این روش و مدل مربوطه در حالت تک‌سوخته مخلوط ایزواکتان-هوا در دو فشارهای اولیه ۱bar و ۱/۵bar و دو نسبت هم‌ارزی ۱/۰ و ۰/۸ طی مقایسه با کار دیگران بررسی شده و نتایج رضایت‌بخشی حاصل شده است. با توجه به شرایط محل آزمایش، فشار اولیه ۵۰۰kPa و دمای اولیه ۳۳۳K در نظر گرفته شد.

## نتایج و بحث

سرعت سوزش آرام به پارامترهایی چون نسبت هم‌ارزی، نوع سوخت، فشار و دمای اولیه مخلوط و کسر گاز رقیق‌کننده وابسته است. ابتدا سرعت سوزش آرام بنزین-هوا و گازطبیعی-هوا در نسبت هم‌ارزی استوکیومتری انجام و در مرحله بعد سرعت سوزش آرام مخلوط بنزین-گاز طبیعی و هوا با درصدهای جرمی گاز طبیعی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد برآورد شد. در روش حاضر، آزمایش‌ها در محفظه حجم ثابت کروی انجام یافته و فشار مبنا است و به‌دلیل بالابودن فشار در طول فرایند امکان وقوع پدیده سلولی شدن<sup>۱</sup> در طول احتراق وجود دارد. این پدیده، که به پارامترهایی مثل فشار، دما، نوع سوخت و کیفیت مخلوط وابسته است، از اثرات موج فشار سوزش (اثرات ترموآکوستیک) روی سطح شعله است و سطح صاف شعله آرام را می‌تواند با ایجاد سلول‌های سطحی کوچک ناصاف کرده و سبب افزایش سرعت سوزش شود [۲۵-۲۷]. نظر به اینکه در پژوهش‌های مربوط به احتراق موتور شرایط در آن‌ها برای وقوع این پدیده فراهم است، لذا خروجی کار حاضر، که برآورد سرعت سوزش آرام از روی تغییرات فشار است و شکل‌گیری پدیده سلولی شدن را دربر دارد، می‌تواند در تحلیل احتراق آن‌ها استفاده شود. همچنین، اثر تغییر سوخت و ترکیب دو سوخت بنزین-گاز طبیعی با درصدهای جرمی مختلف بررسی شد و فشار اولیه ۵۰۰kPa و دمای اولیه ۳۳۳K در شرایط استوکیومتری در نظر گرفته شد.

با توجه به شعاع محفظه حجم ثابت کروی، نمودار تغییرات سرعت سوزش آرام مخلوط بنزین-هوا برحسب رشد شعله در نسبت هم‌ارزی استوکیومتری تا شعاع ۴۵mm در شکل ۲ از کد ترمودینامیکی استخراج و نمایش داده شده است. به‌نظر می‌رسد افزایش ناگهانی سرعت سوزش آرام ناشی از ناپایداری سلولی شعله بوده و کاهش ناگهانی سرعت سوزش آرام در شعاع‌های نزدیک به شعاع محفظه می‌تواند حاصل از اثر دیواره محفظه بر جبهه شعله باشد. بنابراین، سرعت سوزش آرام در شعاع‌هایی کمتر از شعاع محفظه قابل قبول است و مورد بررسی قرار گرفته است.

تغییرات سرعت سوزش آرام برحسب فشار محفظه برای مخلوط استوکیومتری یک بنزین-هوا و گازطبیعی-هوا در شکل ۳ نشان داده شده است. سرعت سوزش آرام با افزایش فشار محفظه سیر صعودی از خود نشان داده و به نظر می‌رسد شیب نمودار سرعت سوزش آرام گازطبیعی-هوا در فشار محفظه ۱۶bar افزایش محسوسی یافته است که در این منطقه می‌تواند افزایش ناپایداری‌های سلولی موجب بروز چنین پدیده‌ای شود.

مدل ترمودینامیکی، به‌طور گام‌به‌گام، تغییرات دمای منطقه نسوخته را می‌تواند برآورد کند. با توجه به اینکه گام محاسباتی بر مبنای گام فشار در طول احتراق بوده است، لذا می‌توان تغییرات دمای منطقه نسوخته را برحسب فشار محفظه، که با پیشروی شعله همراه است، برآورد کرد. حرکت شعله سبب تبدیل تدریجی گاز نسوخته دمایی به گاز سوخته دمابالا می‌شود و به‌خاطر محدودیت در حجم محفظه، انبساط آن سبب متراکم کردن گاز نسوخته باقی‌مانده و گاز سوخته از قبل می‌شود. تراکم گاز نسوخته سبب افزایش دمای آن خواهد شد.

1. Cellularity



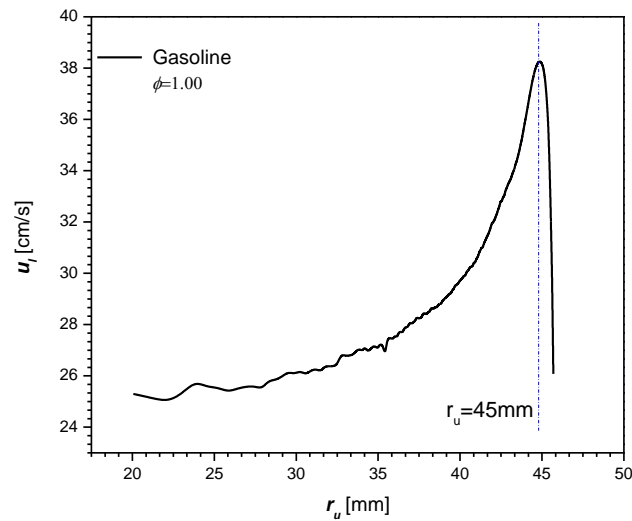


Figure 2- Variation of laminar burning velocity in terms of flame radius  
شکل ۲- تغییرات سرعت سوزش آرام برحسب شعاع شعله

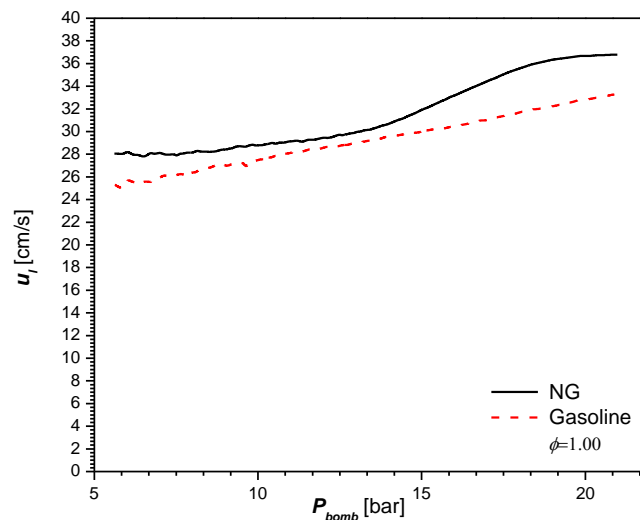


Figure 3- Variations of laminar burning velocities of stoichiometric Gasoline-Air and Natural gas-Air mixtures versus bomb pressure

شکل ۳- تغییرات سرعت‌های سوزش آرام مخلوط‌های استوکیومتری بنزین-هوا و گاز طبیعی-هوا برحسب فشار محفظه

شکل ۴ تغییرات دمای مخلوط نسوخته برآوردی را برحسب فشار محفظه با استفاده از هریک از دو سوخت نشان می‌دهد. روند افزایشی برای هر دو سوخت دیده می‌شود، با این تفاوت که شیب نمودار گاز طبیعی بیشتر از بنزین است که علت آن می‌تواند به تفاوت نسبت گرماهای ویژه دو مخلوط بازگردد.

تغییرات دمای مخلوط نسوخته با فشار برای درصدهای جرمی مختلف مخلوط بنزین-گاز طبیعی با هوا در شکل ۵ مشاهده می‌شود. علت این امر نیز می‌تواند به تفاوت نسبت گرماهای ویژه مخلوط‌ها و تفاوت در سرعت سوزش آرام منسوب باشد. با انجام آزمایش‌هایی در درصدهای جرمی مختلف مخلوط بنزین-گاز طبیعی با هوا تغییرات سرعت سوزش آرام برحسب فشار حاصل شد. بالو و همکاران [۱۹] از مطالعات نیمه تجربی خود رابطه (۸) را برای مخلوط متان-ایزواکتان پیشنهاد دادند.

$$u_{l,blend}(\phi, P_u, T_u) = \exp(Y_{CH_4} \cdot \ln(u_{L,CH_4}(\phi, P_u, T_u)) + (1 - Y_{CH_4}) \cdot \ln(u_{L,C_8H_{18}}(\phi, P_u, T_u))) \quad (۸)$$

که در آن  $Y_{CH_4}$  کسر جرمی سوخت متان در مخلوط دو سوخت است. در شکل‌های مزبور سرعت سوزش آرام مخلوط بنزین-گاز طبیعی و هوا با نتایج تخمینی به‌دست‌آمده از رابطه (۸) مقایسه شده و همگرایی قابل قبولی ملاحظه شد. نتایج تخمینی به‌دست‌آمده از رابطه (۸) بدین صورت است که ابتدا سرعت‌های سوزش آرام تجربی هر یک از ترکیب‌های استوکیومتریک بنزین-هوا و گاز طبیعی-هوا در این رابطه قرار داده شده و براساس درصد جرمی سوخت‌ها در حالت ترکیبی سوز مقدار سرعت سوزش آرام برای حالات ترکیبی سوز تخمین زده شده است. همچنین، درصد انحراف نسبی (DOP) سرعت سوزش آرام مقادیر حاصل از رابطه (۸) با نتایج تجربی، توسط رابطه (۹)، به‌دست آمده است.

$$DOP(\%) = \frac{|u_{l,exp} - u_{l,examine}|}{u_{l,exp}} \times 100 \quad (9)$$

در رابطه بالا،  $u_{l,exp}$  سرعت سوزش آرام حاصل از نتایج تجربی و  $u_{l,examine}$  سرعت سوزش به‌دست‌آمده از رابطه (۸) برای حالت ترکیبی سوز است.

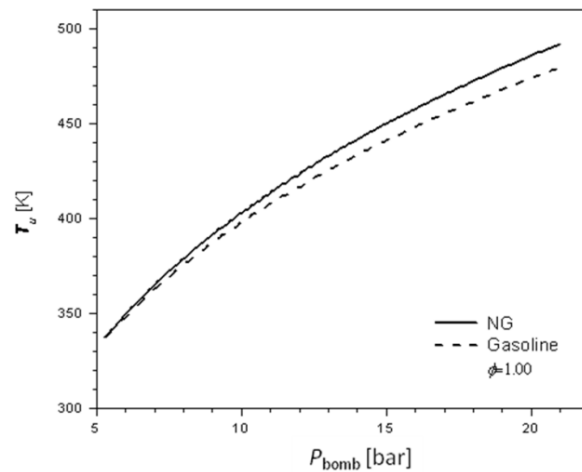


Figure 4- Variations of unburned mixture temperature of Gasoline-Air and Natural gas-Air versus bomb pressure

شکل ۴- تغییرات دمای مخلوط نسوخته بنزین-هوا و گاز طبیعی-هوا بر حسب فشار محفظه

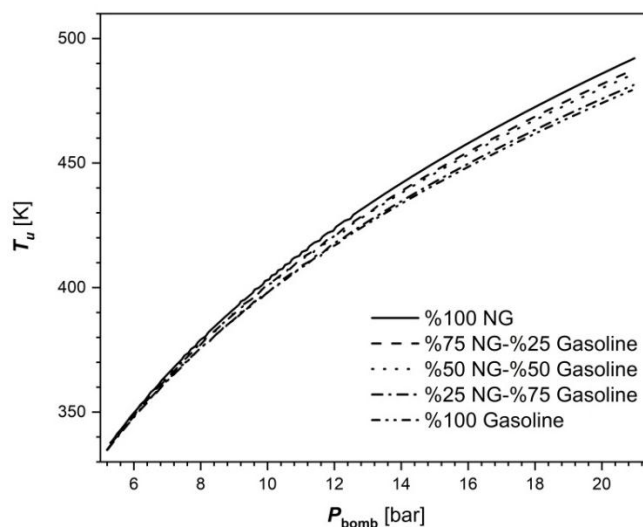


Figure 5- Variations of unburned mixture temperature in terms of bomb pressure

شکل ۵- تغییرات دمای مخلوط نسوخته بر حسب فشار محفظه

سرعت سوزش آرام برای هر سه ترکیب دوسوختی با افزایش فشار محفظه صعودی بوده و مقایسه آن با روند سیر نمودار حاصل از رابطه (۸) می‌تواند مفید باشد. شکل ۶ تغییرات سرعت سوزش آرام تجربی و برآوردی از رابطه (۸) برحسب فشار محفظه را در حالت ترکیبی سوز ۷۵ درصد جرمی بنزین-۲۵ درصد جرمی گاز طبیعی (با سوخت غالب بنزین) و درصد انحراف نسبی آن‌ها نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود حداکثر انحراف کمتر از ۷ درصد با میانگین انحراف تقریباً ۳/۵ درصد است که توافق قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. شکل ۷ این تغییرات را در حالت ترکیبی سوز با درصد‌های جرمی برابر دو سوخت بنزین و گاز طبیعی نشان می‌دهد.

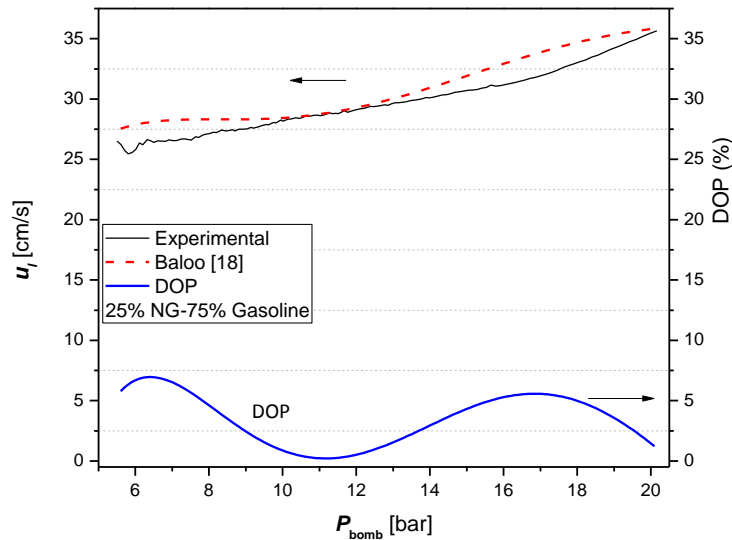


Figure 6- Variation of experimental and the estimated laminar burning velocities versus bomb pressure at 75% Gasoline-25% Natural gas case and their deviation of percentage

شکل ۶- تغییرات سرعت‌های سوزش آرام تجربی و برآوردی در حالت ترکیبی سوز ۷۵ درصد جرمی بنزین-۲۵ درصد جرمی گاز طبیعی و درصد انحراف نسبی آن‌ها برحسب فشار محفظه

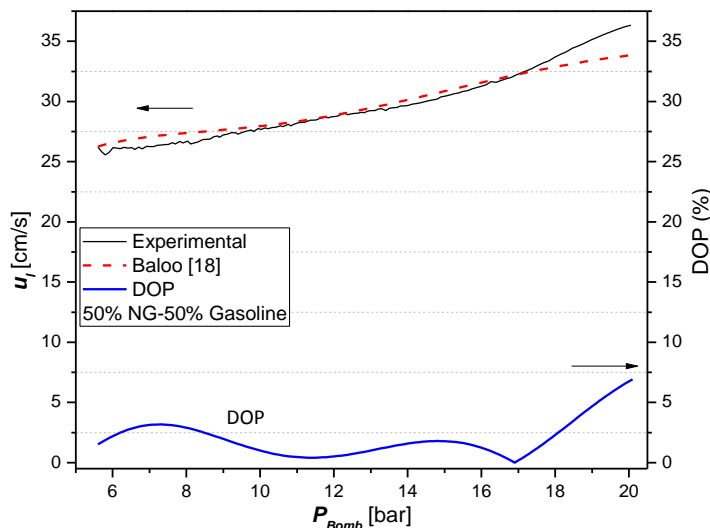


Figure 7- Variation of experimental and the estimated laminar burning velocities versus bomb pressure at 50% Gasoline-50% Natural gas case and their deviation of percentage

شکل ۷- تغییرات سرعت‌های سوزش آرام تجربی و برآوردی در حالت ترکیبی سوز ۵۰ درصد جرمی بنزین-۵۰ درصد جرمی گاز طبیعی و درصد انحراف نسبی آن‌ها برحسب فشار محفظه

ملاحظه می‌شود که تا ۱۷bar حداکثر انحراف کمتر از ۳/۵ درصد با میانگین انحراف تقریباً ۱/۶ درصد است. اما، پس از آن، انحراف بیشتر می‌شود و در ۲۰bar سرعت سوزش نتایج تجربی حدود ۷ درصد بیشتر از مقدار برآوردی از رابطه ۸ است و این رفتار می‌تواند از پدیده سلولاریتی باشد که سبب افزایش جدی در سرعت سوزش آرام در فشار بالا می‌شود. شکل ۸ تغییرات سرعت سوزش آرام تجربی و برآوردی را برحسب فشار محفظه در حالت ترکیبی سوز ۲۵ درصد جرمی بنزین-۷۵ درصد جرمی گاز طبیعی (با سوخت غالب گاز طبیعی) و درصد انحراف نسبی آن‌ها نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که حداکثر درصد انحراف حدود ۵/۳ درصد با میانگین انحراف تقریباً ۲/۱ درصد است. در این نمودار نیز، در فشارهای بالا، نتایج تجربی به دلایل یادشده، بالاتر از مقدار برآوردی از رابطه ۸ است. در مجموع، برای گستره فشار ۵ تا ۲۰bar، توافق قابل ملاحظه‌ای بین نتایج تجربی و رابطه (۸) مشاهده می‌شود و با توجه به شکل منحنی تغییرات در فشارهای نزدیک به ۲۰bar به نظر می‌رسد افزایش انحراف در فشارهای بیش از ۲۰bar دور از انتظار نخواهد بود. همچنین، ملاحظه می‌شود که در گستره فشار مورد مطالعه به‌ازای فشار معین محفظه، با افزایش درصد جرمی سوخت گاز طبیعی در ترکیب دو سوخت، سرعت سوزش آرام افزایش می‌یابد.

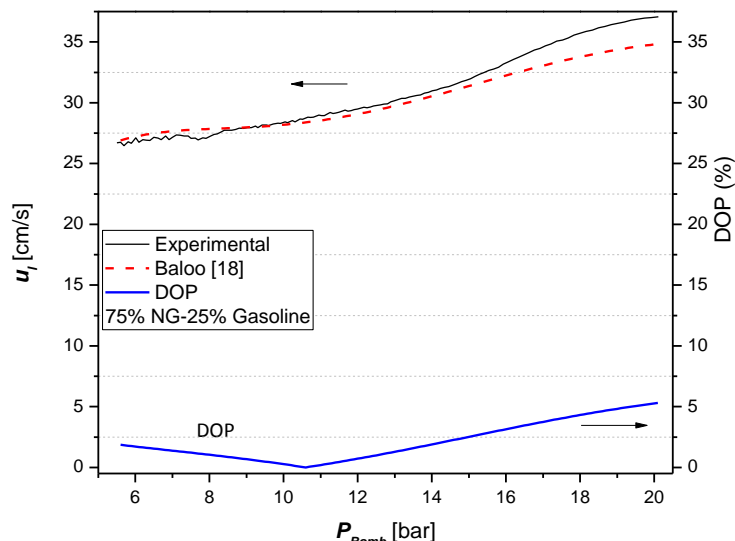


Figure 8- Variation of experimental and the estimated laminar burning velocities versus bomb pressure at 25% Gasoline-75% Natural gas case and their deviation of percentage

شکل ۸- تغییرات سرعت‌های سوزش آرام تجربی و برآوردی در حالت ترکیبی سوز ۲۵٪ جرمی بنزین-۷۵٪ جرمی گاز طبیعی و درصد انحراف نسبی آن‌ها برحسب فشار محفظه

## نتیجه‌گیری

در کار حاضر، با کمک داده‌های خروجی ثبت‌شده و با اعمال آن‌ها به کد ترمودینامیکی، پارامترهای مطلوب تعیین شدند. محفظه حرارتی مورد استفاده در این تحقیق کروی بوده و در محاسبات کد ترمودینامیکی موارد مطلوب تا شعاع ۴۵mm در نظر گرفته شد. کار جدید این پژوهش تعیین سرعت سوزش آرام فشار مبنای مخلوط بنزین و هوا و مخلوط‌های گاز طبیعی-بنزین با هوا با درصدهای جرمی گاز طبیعی (۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪) در نسبت هم‌ارزی استوکیومتری با شرایط اولیه فشار ۴۵ kPa و دمای ۵۰۰ و ۳۳۳K در محفظه حرارتی حجم‌ثابت است. سپس، نتایج سرعت سوزش آرام برای حالات ترکیبی سوز (بنزین-گاز طبیعی) به‌دست‌آمده از نتایج تجربی بررسی و با نتایج برآوردشده از رابطه (۸) مقایسه شدند. از بررسی و بحث روی نتایج به‌دست‌آمده می‌توان موارد زیر را نتیجه گرفت:

- برای مخلوط بنزین-هوا و گاز طبیعی-هوا رشد شعله سبب افزایش فشار و تراکم مخلوط نسوخته می‌شود که این امر باعث افزایش دمای مخلوط نسوخته می‌شود. دمای مخلوط نسوخته نسبت به فشار داخل محفظه سیر صعودی دارد و این سیر صعودی برای بنزین اندکی کمتر از گاز طبیعی است.
- نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که سرعت سوزش گاز طبیعی تا فشار ۲۰ bar بیشتر از بنزین است.
- با افزایش فشار، در ابتدا، سرعت سوزش گاز طبیعی خالص بیشتر از سایر درصدهای جرمی مختلف گاز طبیعی است. اما، با افزایش فشار تا ۱۲ bar، آهنگ افزایش سرعت آن پایین‌تر از حالت‌های دیگر است. از ۱۲ تا ۱۸ bar، سرعت سوزش برای گازخالص با شیب تند افزایش می‌یابد و علت این مسئله احتمالاً به ناپایداری سلولی شعله باز می‌گردد.
- نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی با نتایج به‌دست‌آمده از رابطه (۸) برای حالات ترکیبی سوز مقایسه و بررسی شد و نشان از همگرایی قابل قبولی در گستره فشار مورد اشاره دارد. به‌نظر می‌رسد منبع تفاوت‌های موجود در سرعت سوزش آرام حاصل از آزمایش‌ها و رابطه (۸) می‌تواند تفاوت خواص گاز طبیعی با متان و بنزین با ایزواکتان و ناپایداری سلولی شعله باشد.
- دمای مخلوط نسوخته نسبت به فشار برای مخلوط‌های گازطبیعی-بنزین با هوا با درصد جرمی مختلف گاز طبیعی داخل محفظه سیر صعودی دارد و با کاهش درصد جرمی گاز طبیعی این سیر صعودی اندکی کاهش می‌یابد.

## منابع

1. E. James, "Laminar burning velocities of iso-octane-air mixtures-a literature review," *SAE Technical Paper* 870170, 1987.
2. E. Hu and et al., "Measurements of laminar burning velocities and onset of cellular instabilities of methane-hydrogen-air flames at elevated pressures and temperatures," *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, No. 13, 2009, pp. 5574-5584.
3. S. Liao and et al., "Determination of the laminar burning velocities for mixtures of ethanol and air at elevated temperatures," *Applied Thermal Engineering*, 27, No. 2, 2007, pp. 374-380.
4. D. Razus, D. Oancea and C. Movileanu, "Burning velocity evaluation from pressure evolution during the early stage of closed-vessel explosions," *Journal of Loss Prevention in The Process Industries*, 19, No. 4, 2006, pp. 334-342.
5. K. Saeed and C. Stone, "Measurements of the laminar burning velocity for mixtures of methanol and air from a constant-volume vessel using a multizone model," *Combustion and Flame*, 139, No. 1, 2004, pp. 152-166.
6. T. Tahtouh, F. Halter and C. Mounaïm-Rousselle, "Laminar premixed flame characteristics of hydrogen blended iso-octane-air-nitrogen mixtures," *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, No. 1, 2011, pp. 985-991.
7. N. Peters, *Turbulent combustion*, Cambridge university press, Cambridge, United Kingdom, 2004.
8. X. J. Gu and et al, "Laminar burning velocity and Markstein lengths of methane-air mixtures," *Combustion and Flame*, 121, No. 1, pp. 41-58, 2000..
9. M. Metghalchi and J.C. Keck, "Burning velocities of mixtures of air with methanol, isooctane, and indolene at high pressure and temperature," *Combustion and Flame*, 48, 1982, pp. 191-210.
10. S. Mitra, P. Kumar, "Combustion of Methane-Air in a vessel of Constant Volume," *Proceedings of The XVI National conference on I.C Engines and Combustion*, New delhi, India, 2000, pp. 480-491.
11. C. Mandilas and et al., "Effects of hydrogen addition on laminar and turbulent premixed methane and iso-octane-air flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, 31, No. 1, 2007, pp. 1443-1450.
12. D. Bradley and et al., "Laminar burning velocities of lean hydrogen-air mixtures at pressures up to 1.0 MPa," *Combustion and Flame*, 149, No. 1, 2007, pp. 162-172.
13. S. Jerzembeck and et al., "Laminar burning velocities at high pressure for primary reference fuels and gasoline: Experimental and numerical investigation," *Combustion and Flame*, 156, No. 2, 2009, pp. 292-301.
14. H. Miao and et al., "Laminar burning velocity and Markstein length of nitrogen diluted natural gas/hydrogen/air mixtures at normal, reduced and elevated pressures," *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, No. 7, 2009, pp. 3145-3155.
15. E. Abdi Aghdam, S. M. H. A., "Experimental Study of NG-Air Mixtures at Initially Laminar Conditions," *Journal of Mechanical Eng., Autumn and Winter*, 41, No. 2, 2011, pp. 23-30.
16. E. A. Aghdam, "Wall effect on determination of laminar burning velocity in a constant volume bomb using a quasi-dimensional model," *Applied Mathematical Modelling*, 38, No. 24, 2014, pp. 5811-5821.
17. M. Baloo and et al., "Effect of iso-octane/methane blend on laminar burning velocity and flame instability," *Fuel*, 144, 2015, pp. 264-273.
18. S. Petrakides and et al., "Experimental study on stoichiometric laminar flame velocities and Markstein lengths of methane and PRF95 dual fuels," *Fuel*, 182, 2016, pp. 721-731.

19. M. Baloo and et al., "Effects of pressure and temperature on laminar burning velocity and flame instability of iso-octane/methane fuel blend," *Fuel*, 170, 2016, pp. 235-244.
20. G. Broustail and et al., "Experimental determination of laminar burning velocity for butanol/iso-octane and ethanol/iso-octane blends for different initial pressures," *Fuel*, 106, 2013, pp. 310-317.
21. E. Varea and et al., "Pressure effects on laminar burning velocities and Markstein lengths for iso-octane-ethanol-air mixtures," *Proceedings of the Combustion Institute*, 34, No. 1, 2013, pp. 735-744.
22. J. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill Education, Printed in Singapore, 1988.
23. A. Prothero, *Computing with thermochemical data*, *Combustion and Flame*, 13, No. 4, 1969, pp. 399-408.
24. R. E. Sonntag and et al., *Fundamentals of Thermodynamics*, Wiley, New York, 2003.
25. S. Liao and et al., "Measurements of Markstein numbers and laminar burning velocities for liquefied petroleum gas-air mixtures," *Fuel*, 83, No. 10, 2004, pp. 1281-1288.
26. N. Hinton, R. Stone and R. Cracknell, "Laminar burning velocity measurements in constant volume vessels-reconciliation of flame front imaging and pressure rise methods," *Fuel*, 211, 2018, pp. 446-457.
27. N. Hinton and et al., "Aqueous ethanol laminar burning velocity measurements using constant volume bomb methods," *Fuel*, 214, 2018, pp. 127-134.

## English Abstract

### Experimental study of laminar burning velocity for dual fuel (Gasoline-NG)-air mixture using pressure record in a spherical combustion bomb at high primary pressure

Ebrahim Abdi Aghdam<sup>1\*</sup>, Mehrdad Sarabi<sup>2</sup> and Mojtaba Mehrbod Khomeyrani<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, eaaghdam@uma.ac.ir

2- Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, M.sarabi67@gmail.com

3- Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

\*Corresponding author

(Received: 2017.11.07, Received in revised form: 2017.12.21, Accepted: 2018.01.03)

The turbulent burning velocity of air-fuel mixture depends on the laminar burning velocity and turbulent aspects. The main factors influencing the laminar burning velocity are the fuel type, pressure, temperature and equivalence ratio of the mixture. In the current work, a constant volume spherical bomb and its related equipment are used to capture the experimental pressure-time data during combustion. The data is defined as input to a multi-zone thermodynamic model to calculate the laminar burning velocity. The velocity is evaluated for gasoline-air and natural gas (NG)-air mixtures at stoichiometric equivalence ratio and NG-gasoline-air mixtures with NG mass fraction of 25%, 50%, 75% and 100% at stoichiometric conditions with initial pressure and temperature of 500kPa and 333K, respectively. The obtained results of laminar burning velocity of gasoline-air in comparison with NG-air mixtures shows that the NG-air laminar burning velocity in the range of 5 to 20bar is higher than that of gasoline-air mixture. For dual fuel NG-gasoline it is observed that at the stoichiometric conditions and when the bomb pressure is lower than 20bar, the laminar burning velocities of 25% and 50% NG in dual case are lower than in the case of 100% NG.

**Keywords:** Laminar burning velocity, Combustion bomb, Natural gas, Gasoline, Dual-fuel mixture.