

مطالعه‌ی تجربی سرعت سوختن مخلوط گاز طبیعی – هوا با شرایط اولیه آرام

ابراهیم عبدی اقدم

استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

سیدمیثم حسینی اصل

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

چکیده

سرعت سوختن آرام که یکی از مهمترین مشخصه‌های ترموشیمیایی هر مخلوط قابل احتراق است در برآورد سرعت سوختن متلاطم نقش حیاتی دارد. این سرعت به متغیرهایی از قبیل نوع سوخت، ترکیب مخلوط، دما و فشار وابسته است. برآورد سرعت سوختن در دماها و فشارهای مختلف مخلوط گاز طبیعی – هوا با استفاده از نتایج تجربی و استخراج رابطه‌ی همبستگی مربوطه از اهمیت بالایی برخوردار است. برای نیل به این هدف نتایج تجربی فشار- زمان حاصله از احتراق مخلوطهای استوکیومتری گاز طبیعی- هوا در گستره‌ی دمای اولیه ۳۰۰ تا ۳۶۰K و گستره‌ی فشار اولیه ۳ تا ۷/۵bar با شرایط اولیه‌ی آرام در یک بمب گرمایی کروی استخراج شد و برای چندین آزمایش بصورت ورودی به یک کد شبیه‌ساز احتراق ترمودینامیکی دو منطقه‌ای وارد و سرعت سوختن در طول پریود احتراق بر حسب فشار داخل بمب محاسبه شد. بررسی‌ها نشان داد که خطای این روش در ابتدای فرآیند احتراق، مرحله‌ای که فشار بمب به فشار اولیه خیلی نزدیک است بیشتر بوده و بعد از این مرحله نتایج حاصله از دقت خوبی برخوردار است. مدل تابع همبستگی سرعت سوختن به صورت $u_l = u_{l0} (T/T_0)^\alpha (P/P_0)^\beta$ مورد ارزیابی قرار گرفت. ثابت‌های α و β از روش برازش کمترین مربعات خطی روی بیش از ۵۰۰۰ داده‌ی سرعت سوختن تعیین شد و به ترتیب مقادیر (cm/s) ۲۲/۵۵، ۱/۶۸ و -۰/۲۴ با میانگین انحراف ۲/۹۲٪ حاصل گردید. تأثیر دما و فشار به تنهایی روی سرعت سوختن مورد بررسی قرار گرفت و نتایج قابل قبولی در مقایسه با کار سایر محققان بدست آمد.

کلمات کلیدی: سرعت سوختن، آرام، گاز طبیعی، آزمایشگاهی

Experimental Study of NG-Air Mixtures at Initially Laminar Conditions

E. Abdi Aghdam Assistant Professor, Mechanical Group, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

S. M. Hosseini Asl M.Sc Student, Mechanical Group, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

Abstract

Laminar burning velocity is one of the most important thermo chemical properties of any combustible mixture. it relates to some variables such as type of fuel, mixture composition, its temperature and pressure. Laminar burning velocity plays a vital role in evaluating turbulent burning velocity. Evaluating laminar burning velocity at different temperatures and pressures of NG-air mixtures using experimental data and finding out a related correlation are more important. To meet the aims, a significant set of experimental pressure-time data were recorded for combustion of NG-air stoichiometric mixtures at the ranges of initial temperature of 300 to 360K and initial pressure of 3 to 7.5 bar; then they defined as input to a simulator of two zone thermodynamic combustion model and burning velocities in terms of bomb pressure during combustion period were calculated. Error analysis showed that the estimation was faced with large error at the early stage and low error at the other stages of combustion. The selected function used to correlate the laminar burning velocity versus temperature and pressure was in the form of $u_l = u_{l0} (T/T_0)^\alpha (P/P_0)^\beta$. The least square method was utilized to determine u_{l0} , α and β over more than 5000 data of burning velocity and their values were found to be 22.55(cm/s), 1.68 and -0.24, respectively, with average deviation of 2.92%.

Keywords: Burning velocity, Laminar, Natural gas, Experimental.

۱- مقدمه

با افزایش قیمت نفت خام در سال‌های اخیر، کاهش اجتناب‌ناپذیر منابع بنزین و افزایش نگرانی حفاظت از محیط زیست، مطالعه روی سوخت‌های جایگزین بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته به طوری که امنیت انرژی و هوای پاک دو موضوع مورد توجه در سطح جهان مطرح شده است. از مطالعات اولیه گاز طبیعی به عنوان یکی از امیدبخش‌ترین سوخت‌های پاک جایگزین بالاخص در ایران مدنظر شناخته شده است [۱] و [۲].

سرعت سوختن آرام گاز طبیعی در ترکیب خاص با استفاده از روش مشاهده‌ای (فیلمبرداری) و تمرکز روی مرحله‌ی اولیه‌ی احتراق که فشار بمب تغییرات چندانی نمی‌یابد برای فشار پایین با گستره‌ی کوچک صورت گرفته است [۳].

سرعت سوختن آرام یکی از خواص اساسی یک مخلوط پیش آمیخته است و داده‌های قابل اعتماد آن برای کاربردهای احتراق لازم است. از اواخر ۱۹۷۰ میلادی، پیشرفت‌های مهمی برای فهم اثرات کشیدگی شعله بر روی سرعت سوختن آرام صورت گرفت [۴].

برای تحلیل فرآیند احتراق در موتور که ماهیتی تلاطمی دارد، تعیین سرعت سوختن آرام ضروری است. سرعت سوختن تابعی از پارامترهای فشار، دما، نسبت هم ارزی و نوع سوخت می‌باشد و از طرفی سرعت سوختن متلاطم تابعی از سرعت سوختن آرام، شدت تلاطم و مقیاس طولی تلاطم است. با ثابت نگه داشتن متغیرهای مخلوط، سرعت سوختن آرام مقداری معین دارد [۵]. واضح است که با تغییر نوع سوخت، سرعت سوختن آرام تغییر می‌کند و در نتیجه در میدان جریان متلاطم سرعت سوختن متأثر می‌شود. مشخصه‌های تلاطم به طرح و هندسه‌ی موتور ارتباط دارد. اگر مشخصات فیزیکی موتور ثابت بماند، با تغییر نوع سوخت، توان خروجی موتور و بازده حجمی و حرارتی متأثر می‌شود. بنابراین با تغییر سوخت، اصلاح در ساختار و تنظیمات موتور ضروری خواهد بود.

لیاو و همکاران [۳] برای اندازه‌گیری سرعت سوختن آرام، از رشد کروی شعله‌ی مخلوط هوا-گاز طبیعی استفاده کردند. آنها نسبت هم‌ارزی را از ۰٫۶ تا ۱٫۴، فشار اولیه را ۰٫۰۵، ۰٫۱ و ۰٫۱۵ MPa و دما را از ۳۰۰ تا ۴۰۰ K اختیار کردند. آنها با استفاده از روش مشاهده‌ی شلیرن برای گستره‌ی فشار، دما و نسبت هم‌ارزی مورد مطالعه، شکل تابعی سرعت‌های سوختن را به صورت $u_l = u_{l0} (T/T_0)^\alpha (P/P_0)^\beta$ در نظر گرفتند و برای برقراری جریان آرام زمان انتظار را ۱۰ دقیقه در نظر گرفتند.

میاو و همکاران [۱] مشخصه‌های شعله آرام مخلوط گاز طبیعی-هیدروژن-هوا-گاز رقیق‌کننده (نسبت دی اکسید کربن به نیتروژن) را با استفاده از یک بمب احتراق حجم ثابت و روش مشاهده‌ای مورد مطالعه قرار دادند. برای امکان فیلم‌برداری بهتر آنها از بمب استوانه‌ای با قطر داخلی ۱۳۰ mm و ارتفاع ۱۳۰ mm با قاعده‌های شیشه‌ای استفاده کردند.

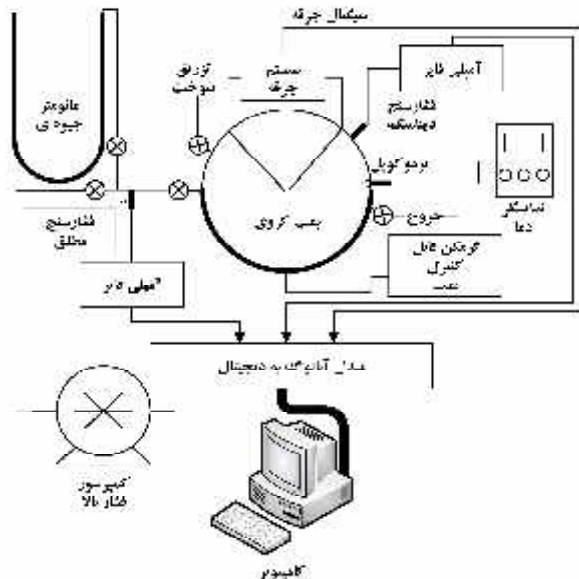
پارچا و همکاران [۸] مطالعات عددی و تجربی سرعت سوختن آرام در مخلوط هیدروژن-هوا در فشار استاندارد و دمای اتاق با تغییر نسبت هم‌ارزی از ۰٫۸ تا ۳ از طریق مشعل با سوراخ نازل به ابعاد ۴×۱۰ میلی‌متر انجام دادند. اندازه‌گیری‌های سرعت سوختن آرام از طریق عکس‌برداری شلیرن و سرعت‌سنجی با ردیابی ذره صورت گرفت. آنها با استفاده از این تکنیک اطلاعات لحظه‌ای را از سرعت سوختن محلی در تمام ناحیه‌ی جبهه‌ی شعله فراهم کردند. در این روش با استفاده از مقدار متوسط سرعت‌های سوختن محلی، سرعت‌های سوختن آرام تعیین می‌شود.

در کار حاضر روشی با تلفیق تغییرات فشار ثبت شده و مدل شبه ابعادی ترمودینامیکی دو منطقه‌ای بکار گرفته شده است که بنوبه‌ی خود از مزیت‌هایی در مقایسه با روشهای فیلم‌برداری سریع و روشهای صرفاً فشار مینا برخوردار است.

۲- تجهیزات بکار رفته و روش انجام آزمایش

برای استخراج نتایج تجربی از یک بمب کروی دو تکه به شعاع ۴۶ mm مجهز به سیستم‌های اندازه‌گیری فشار و دمای مخلوط استفاده شد. فشار مطلق اولیه‌ی مخلوط بمب قبل از احتراق از طریق دو نوع ترانسدیوسر کیسلر نوع 4005B و 4005F به ترتیب با سقف فشار مجاز 5 و 20 bar اندازه‌گیری شد. از ویژگی‌های این حسگرهای فشار می‌توان به اندازه‌گیری با دقت بالا، ابعاد فشرده و جرم کم اشاره کرد. این ترانسدیوسرها در مسیر ورودی نزدیک به بمب نصب می‌شدند و قبل از احتراق با بستن شیر ورودی به بمب از فشارهای بالای ناشی از احتراق بالا محفوظ می‌ماندند.

برای اندازه‌گیری تغییرات فشار طی فرآیند احتراق از یک ترانسدیوسر فشار دینامیک کیسلر نوع 6052C با سقف فشار قابل تنظیم 50 و 100 bar و حداکثر دمای قابل اعتماد 400°C استفاده شد. از ویژگی‌های این حسگر می‌توان به پایداری مناسب حساسیت در برابر دما، حساسیت بالا و پایین بودن خطای شوک حرارتی اشاره کرد. برای اخذ داده‌ها، مبدل



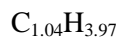
شکل ۱- نمودار مجموعه تجهیزات استفاده شده در آزمایش.

برای حفاظت ترانسدیوسر فشار مطلق نصب شده شیر ورودی بمب بسته و برای حصول از اختلاط همگن و ناپدید شدن تلاطم ۱۰ دقیقه مدت انتظار در نظر گرفته شد. پس از ایجاد جرقه، تغییرات فشار داخل بمب در طول احتراق ثبت گردید. ترکیب گاز طبیعی با استعلام از اداره‌ی گاز استان اردبیل در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- ترکیب گاز طبیعی

گونه	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂
درصد حجمی	۸۸٫۳۳۲	۴٫۶۷۲	۱٫۱۳۷	۰٫۴۸۴	۰٫۱۸۱	۰٫۶۹۴	۴٫۵

فرمول متوسط بخش هیدروکربن گاز طبیعی به صورت زیر قابل بیان است:



۳- مدل احتراق شبه ابعادی

مدل احتراق بکار رفته در این کار یک مدل ترمودینامیکی دو منطقه‌ای با مفروضات زیر است:

- فضای بمب به دو منطقه‌ی نسوخته و سوخته تقسیم می‌شود.
- ترکیب منطقه نسوخته ثابت و ترکیب منطقه سوخته در تعادل شیمیایی است.
- توزیع مکانی دما در هر منطقه یکنواخت است.
- از انتقال گرما بین دو منطقه و جداره‌ی بمب طی

قابل تنظیم تا 800kHz بکار گرفته شد. برای کنترل دمای مخلوط داخل بمب از گرمکن برقی با المان نواری مقطع مستطیلی که روی سطح خارجی بمب بطور مارپیچی نصب شده بود، استفاده شد. این گرمکن به یک ترموکوپل و برد الکترونیکی قابل تنظیم دما مجهز بود. برای تنظیم و قرائت دمای مخلوط داخل بمب قبل از وقوع احتراق از یک ترموکوپل نوع K و نمایشگر مربوطه استفاده شد. گستره‌ی دمایی نمایشگر 0-200°C و ساخت شرکت ATBIN بود. از باتری نوع مستقیم ۱۲ ولتی و یک کویل برای تامین ولتاژ جرقه استفاده شد. برای ایجاد جرقه در مرکز بمب، الکترودهای مثبت و منفی با فاصله‌ی مناسب از هم تنظیم شد.

برای تهیه‌ی مخلوط مناسب سوخت و هوا بر پایه فشار جزئی، یک سیلندر- پیستون پنوماتیک به بمب نصب شد و برای قرائت فشار خلأ با دقت بیشتر، از یک فشارسنج جیوه‌ای اختلافی قابل اتصال به بمب استفاده شد. نمودار طرحواره مجموعه تجهیزات بکار رفته در شکل ۱ نشان داده شده است.

در ابتدای آزمایش، بمب گرمایی با هوای فشرده‌ی کمپرسور تمیز می‌شد. برای این کار شیرهای مسیر ورودی و خروجی بمب باز می‌شد تا امکان جریان از میان بمب فراهم شود. این جریان بمدت مناسب انجام می‌گرفت تا از عدم حضور سوخت یا محصولات احتراق در داخل بمب اطمینان حاصل شود. در مدت انتظار بیش از ۲۰۰ برابر حجم بمب، هوا از میان بمب عبور می‌کرد. سپس بجای شلنگ هوا، شلنگ گاز جایگزین می‌شد تا گاز از میان بمب جریان یابد و داخل بمب با گاز خالص پر شود. در این مرحله مسیر سیستم خلا‌ساز نیز باز می‌شد و با حرکت دادن پیستون مربوطه در اثنای جریان گاز شلنگ ارتباطی با گاز پر می‌شد. خروجی بمب شلنگ طولی نصب شده بود تا گاز را به محیط خارج از آزمایشگاه هدایت کند. پس از مدت مناسب (زمان مربوط به عبور بیش از ۱۰۰ برابر حجم بمب) شیر ورودی بمب بسته می‌شد تا فشار داخل بمب با فشار محیط یکی شود. سپس با بستن شیر خروجی و حرکت دادن پیستون سیستم خلا‌ساز، خلأ حاصله از طریق فشارسنج جیوه‌ای مشاهده و با ملاحظه‌ی همزمان دمای گاز به فشار مورد نظر تنظیم می‌شد. بعد از بستن مسیرهای بین بمب و فشارسنج و سیستم خلا‌ساز، شلنگ هوای فشرده به ورودی بمب بسته می‌شد و با ملاحظه‌ی همزمان فشار مطلق و دمای مخلوط داخل بمب، شرایط اولیه مورد نظر برای فشار و دما فراهم می‌شد.

$$u_u(T_u) \frac{dm_u}{dt} + m_u \frac{u_u(T_u)}{dt} = 0 \quad (۸)$$

برای تعیین کسر گونه‌های در تعادل شیمیایی منطقه‌ی سوخته از موازنه‌ی عنصری معادله‌ی واکنش بین واکنش‌گرها و محصولات و همچنین شش معادله‌ی استوکیومتری تعادل شیمیایی بشرح زیر استفاده شد [۹]:

$$C_n H_m O_l + \frac{\alpha_s}{\phi} (O_2 + \psi N_2) \rightarrow (x_1 CO + x_2 CO_2 + x_3 H_2O + x_4 OH + x_5 O + x_6 H_2 + x_7 H + x_8 N_2 + x_9 O_2 + x_{10} NO) n_p \quad (۹)$$

که در آن ψ نسبت مولی نیتروژن اتمسفری به اکسیژن در هواست، n_p ، تعداد مول محصولات به ازای یک مول سوخت. x_1, x_2, \dots, x_{10} کسرهای مولی گونه‌های محصولات و $\alpha_s = (n + m/4 - l/2)$ است. از موازنه عنصری می‌توان نوشت:

$$x_1 + x_2 = \frac{n}{n_p} \quad (۱۰)$$

$$2x_3 + x_4 + 2x_6 + x_7 = \frac{m}{n_p} \quad (۱۱)$$

$$x_1 + 2x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_{10} = (\phi l + 2\alpha_s) / \phi n_p \quad (۱۲)$$

$$2x_8 + x_9 + x_{10} = \frac{2\alpha_s \psi}{\phi n_p} \quad (۱۳)$$

$$\sum_{i=1}^{10} x_i = 1 \quad (۱۴)$$

و شش معادله استوکیومتری تعادل و روابط ثابتهای تعادل آنها با کسرهای مولی و فشار کل عبارتند از:

$$0.5H_2 \leftrightarrow H, \quad k_1 = \frac{x_7 P^{0.5}}{x_6^{0.5}} \quad (۱۵)$$

$$0.5O_2 \leftrightarrow O, \quad k_2 = \frac{x_5 P^{0.5}}{x_9^{0.5}} \quad (۱۶)$$

$$CO_2 \leftrightarrow CO + 0.5O_2, \quad k_3 = \frac{x_1 x_9^{0.5} P^{0.5}}{x_2} \quad (۱۷)$$

$$H_2O \leftrightarrow H_2 + 0.5O_2, \quad k_4 = \frac{x_6 x_9^{0.5} P^{0.5}}{x_3} \quad (۱۸)$$

$$H_2O \leftrightarrow 0.5H_2 + OH, \quad k_5 = \frac{x_6 x_4^{0.5} P^{0.5}}{x_3} \quad (۱۹)$$

پریود احتراق صرفنظر می‌شود.

- رشد منطقه‌ی سوخته کروی به مرکزیت بمب (محل جرقه شمع) است.
- تمامی گونه‌های موجود در دو منطقه گاز کامل‌اند.
- تراکم منطقه‌ی سوخته در اثر انبساط منطقه‌ی سوخته آیزنتروپیک است (رعایت قانون دوم).
- انرژی داخلی کل محتویات بمب ثابت می‌ماند (رعایت قانون اول).
- مجموع جرم دو منطقه و همچنین مجموع حجم دو منطقه ثابت می‌ماند (اصل بقای جرم و فرض صلبیت بمب).

با رعایت مفروضات فوق محاسبات بصورت گام به گام با استفاده از شرایط اولیه‌ی معلوم و معادلات مربوطه برای دو منطقه بشرح زیر انجام گرفته است:

اصل بقای جرم

$$\frac{dm_b}{dt} + \frac{dm_u}{dt} = 0 \quad (۱)$$

اصل صلبیت بمب حرارتی

$$\frac{dV_b}{dt} + \frac{dV_u}{dt} = 0 \quad (۲)$$

یکنواختی توزیع فشار در داخل بمب

$$P_b = P_u = P \quad (۳)$$

$$\frac{dP_b}{dt} = \frac{dP_u}{dt} = \frac{dP}{dt} \quad (۴)$$

معادله حالت گاز ایده‌آل برای منطقه سوخته،

$$V_u \frac{dP}{dt} + P \frac{dV_u}{dt} - R_u T_u \frac{dm_u}{dt} - m_u R_u \frac{dT_u}{dt} = 0 \quad (۵)$$

و برای منطقه سوخته،

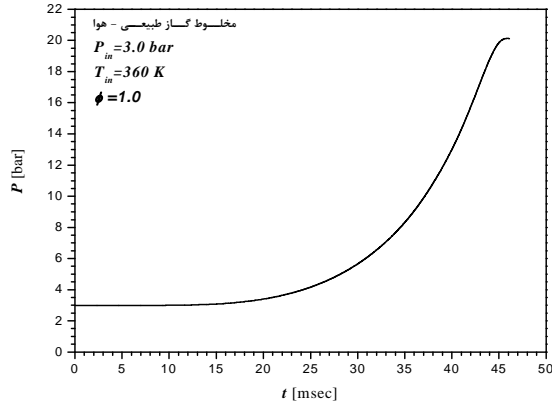
$$V_b \frac{dP}{dt} + P \frac{dV_b}{dt} - \frac{\tilde{R}}{M_b} T_b \frac{dm_b}{dt} - m_b \frac{\tilde{R}}{M_b} \frac{dT_b}{dt} + \frac{m_b T_b \tilde{R}}{M_b^2} \frac{dM_b}{dt} = 0 \quad (۶)$$

از تراکم آیزنتروپیک منطقه‌ی سوخته،

$$\left(\frac{V_u}{m_u} \right)^{\gamma_u} \frac{dP}{dt} + P \gamma_u \frac{V_u^{\gamma_u-1}}{m_u^{\gamma_u}} \frac{dV_u}{dt} - P \gamma_u \frac{V_u^{\gamma_u}}{m_u^{\gamma_u+1}} \frac{dm_u}{dt} + P \left(\frac{V_u}{m_u} \right) \ln \left(\frac{V_u}{m_u} \right) \frac{d\gamma_u}{dT_u} \frac{dT_u}{dt} = 0 \quad (۷)$$

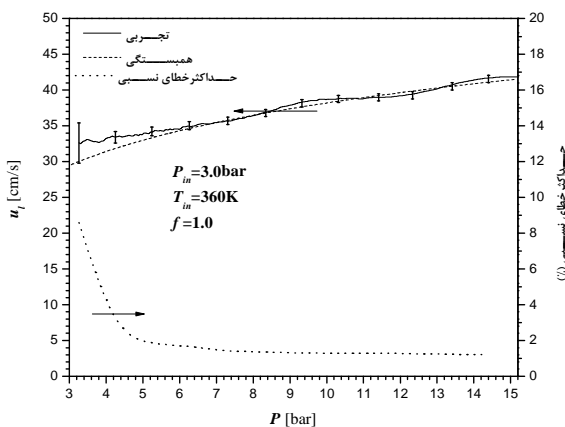
اصل بقای انرژی

$$u_b(T_b) \frac{dm_b}{dt} + m_b \frac{u_b(T_b)}{dt} +$$

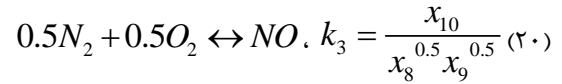


شکل ۲- تغییرات فشار داخل بمب نسبت به زمان طی فرآیند احتراق در حالت $P_{in}=3.0\text{bar}$ و $T_{in}=360\text{K}$ برای یک آزمایش نوعی با مخلوط استوکیومتری گاز طبیعی - هوا.

شکل ۳ نتایج خروجی سرعت سوختن و حداکثر خطای نسبی آن برحسب فشار بمب را برای این آزمایش نوعی به همراه مجموع خطاهای ناشی از اندازه گیریها و روش بکار رفته نشان می‌دهد. در بررسی های بعمل آمده مشاهده شد که اثر خطاهای اندازه گیری روی مقدار سرعت سوختن تقریباً ثابت می‌ماند اما خطای روش در آغاز احتراق بیشتر و بعد از 6 bar ثابت مانده است. چنانکه از نمودار حداکثر خطای نسبی سرعت سوختن مشاهده می‌شود در مراحل اولیه‌ی رشد شعله روش بکاررفته دقت خوبی ندارد اما برای مراحل دیگر دقت قابل قبولی را فراهم می‌کند. تأثیر خطا در اندازه گیریها روی مقدار نسبت هم‌ارزی در پیوست (الف) تشریح شده است. نمودار خط چین مربوط به رابطه‌ی همبستگی است که توافق خوبی با نتایج آزمایش نوعی دارد.



شکل ۳- سرعت سوختن و حداکثر خطای نسبی آن برحسب فشار بمب برای حالت $P_{in}=3.0\text{bar}$ و $T_{in}=360\text{K}$ به همراه مجموع خطاهای ناشی از اندازه گیریها و روش بکار رفته.



در یک دمای معین می‌توان ثابتهای تعادل شیمیایی معادلات فوق را از داده‌های ترمودینامیکی بدست آورد و در فشار معین به شش معادله بین کسر گونه‌های سوخته دست یافت. در مجموع با حل همزمان یازده معادله اخیر می‌توان کسر ده گونه‌ی محصولات و تعداد مول محصولات به ازای یک مول سوخت (n_p) محاسبه کرد.

برای تعریف مدل ترمودینامیکی شبه-ابعادی دو منطقه‌ای و تعیین سرعت سوختن، برنامه‌ای بزبان فرترن نوشته شد و شرایط اولیه‌ی آزمایش شامل نوع سوخت، نسبت هم‌ارزی، فشار و دما و همچنین تغییرات فشار ثبت شده به همراه فرکانس اخذ داده‌ها بصورت ورودی به برنامه تعریف شد و با انجام محاسبات تکراری حدس و خطا و ارضای روابط (۱ تا ۱۳) بصورت گام به گام با گام محاسباتی 0.05bar ، مقدار جرم سوخته طی گام محاسبه و سرعت سوختن از رابطه‌ی زیر برآورد شد:

$$u_l = \frac{\Delta m_b}{\rho_u A_f \Delta t} \quad (21)$$

۴- نتایج

با استفاده از مدل دو منطقه‌ای مذکور داده‌های فشار-زمان طی احتراق به همراه شرایط اولیه قبل از احتراق به برنامه‌ی مربوطه بصورت ورودی داده شد و سرعت سوختن در طول احتراق تعیین گردید. شکل ۲ تغییرات فشار داخل بمب نسبت به زمان طی فرآیند احتراق را در حالت $P_{in}=3.0\text{bar}$ و $T_{in}=360\text{K}$ برای یک آزمایش نوعی با مخلوط استوکیومتری گاز طبیعی - هوا را نمایش می‌دهد. قله فشار حاصله حدود 20 bar است و مدت زمان رسیدن به آن 46 msec است. طی نصف زمان مذکور فشار داخل بمب فقط 0.8 bar افزایش می‌یابد.

در دامنه‌های فشار و دمای به ترتیب 4.4 تا 45bar و 300 تا 550K برای مجموعاً ۵۷۲۶ تعداد داده حاصله از چندین آزمایش، یک رابطه‌ی همبستگی با استفاده از روش کمترین مربعات خطی برازش شد که نتیجه‌ی آن حصول u_{10} ، α و β مناسب با میانگین انحراف 2.92% شد. مقدار u_{10} ، α و β به قرار زیر است:

$$u_{10}=22.55(\text{cm/s})$$

$$\alpha=1.68$$

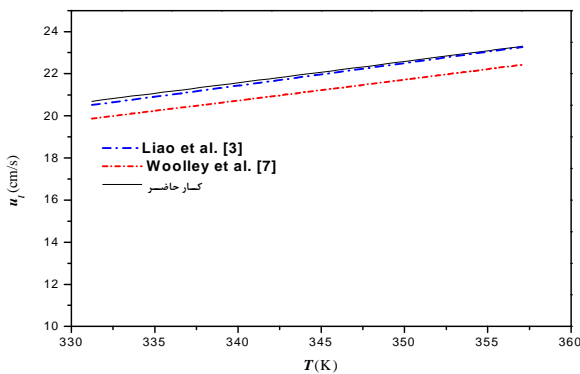
$$\beta=-0.24$$

در فشار ثابت ۷٫۵ bar بار معادله‌ی لیاو و وولی به صورت زیر در می‌آید:

$$u_i = 17.7(T/300)^{1.58} \quad (25)$$

$$u_i = 16.94(T/300)^{1.612} \quad (26)$$

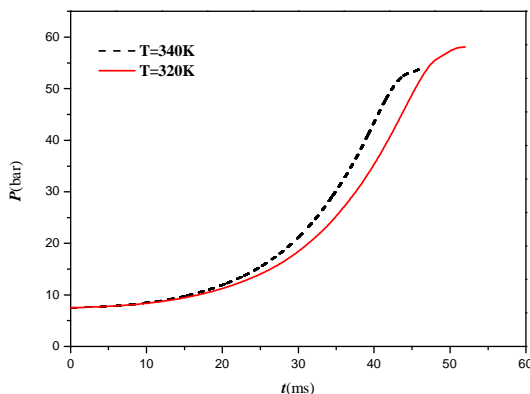
شکل ۵ تغییرات سرعت سوختن آرام در فشار ثابت را برای کار حاضر و دیگران نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که منحنی تغییرات سرعت سوختن آرام نسبت به دما در فشار ثابت در کار حاضر اندکی بالاتر قرار گرفته است. نتایج کار حاضر به خروجی همبستگی لیاو نزدیکتر است.



شکل ۵- سرعت سوختن آرام کار حاضر و دیگران در فشار ثابت نسبت به دما.

۳-۴- تغییرات فشار بر حسب زمان

نمودار فشار بر حسب زمان در دو دمای اولیه ۳۲۰ و ۳۴۰ K در شکل ۶ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دما، به علت کاهش جرم از حداکثر فشار کاسته می‌شود.



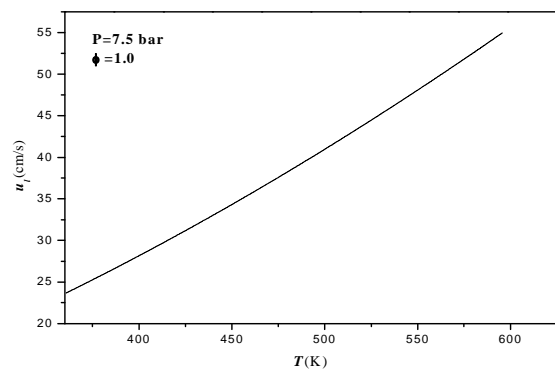
شکل ۶- مقایسه‌ی تغییرات فشار نسبت به زمان در دو دمای ۳۴۰ K و ۳۲۰ K.

۴-۱- نمودار وابستگی سرعت سوختن آرام به دما در فشار ثابت

در فشار ثابت ۷٫۵ bar معادله‌ی سرعت سوختن به صورت زیر بر حسب دما قابل بیان است:

$$u_i = 17.43 \left(\frac{T}{300} \right)^{1.68} \quad (22)$$

شکل ۴ تغییرات سرعت سوختن را نسبت به دما در فشار ثابت ۷٫۵ bar برای $\phi = 1.0$ نشان می‌دهد. با افزایش دما سرعت سوختن افزایش می‌یابد.



شکل ۴- تغییرات سرعت سوختن آرام نسبت به دما در فشار ثابت.

۴-۲- مقایسه با کار دیگران

رابطه‌ی همبستگی لیاو برای مخلوط گاز طبیعی و هوا در نسبت هم‌ارزی ۱، فشار اولیه ۰٫۰۵، ۰٫۱، و ۰٫۱۵ MPa و دمای ۳۰۰ تا ۴۰۰ K به صورت زیر می‌باشد:

$$u_i = 39.45 \left(\frac{T}{300} \right)^\alpha \left(\frac{P}{1} \right)^\beta \quad (23)$$

که مقدار α و β در نسبت هم‌ارزی ۱ به قرار زیر است:

$$\alpha = 1.58$$

$$\beta = -0.398$$

رابطه‌ی همبستگی وولی^۱ برای مخلوط متان و هوا در نسبت هم‌ارزی ۱، فشار ۰٫۱ تا ۱ MPa و دمای ۳۰۰ تا ۴۰۰ K به صورت زیر می‌باشد:

$$u_i = 36 \left(\frac{T}{300} \right)^\alpha \left(\frac{P}{1} \right)^\beta \quad (24)$$

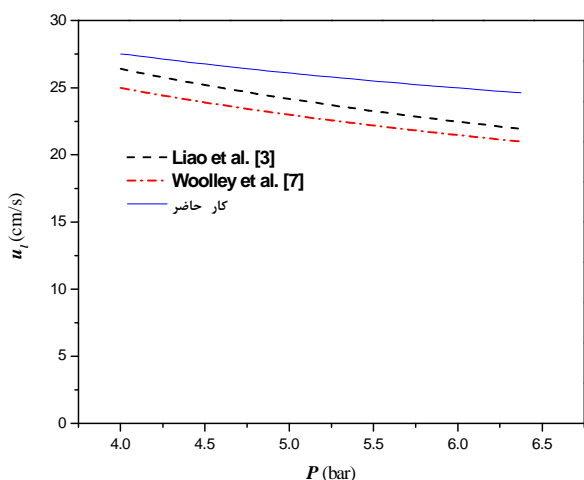
که مقدار α و β در نسبت هم‌ارزی ۱ به قرار زیر است:

$$\alpha = 1.612$$

$$\beta = -0.374$$

1- Woolley

- با استفاده از این روش استخراج سرعت سوختن در حین تغییر دما و فشار مخلوط نسوخته با دقت مناسب امکانپذیر است در حالی که در روش مشاهده‌ای (فیلمبرداری) اندازه‌گیری‌ها به مراحل ابتدای رشد شعله معطوف می‌باشد که در آن دما و فشار مخلوط نسوخته تقریباً ثابت است.
- با افزایش فشار در دمای ثابت سرعت سوختن کاهش و با افزایش دما در فشار ثابت سرعت سوختن افزایش می‌یابد.
- حداکثر خطای سرعت سوختن ناشی از خطا در اندازه‌گیری‌ها تقریباً ثابت می‌ماند.



شکل ۸- مقایسه‌ی نمودار سرعت سوختن آرام کار حاضر با دیگران در دمای ثابت.

پیوست

آنالیز عدم قطعیت^۱

در کار حاضر نسبت هم‌ارزی از روی فشارهای جزئی گاز طبیعی و هوا در مخلوط تنظیم شده است. خطاهای ناشی از اندازه‌گیری فشارها می‌تواند روی نسبت هم‌ارزی تنظیم شده تاثیر بگذارد. از تعریف نسبت هم‌ارزی رابطه‌ی زیر با فشارهای جزئی حاصل می‌شود:

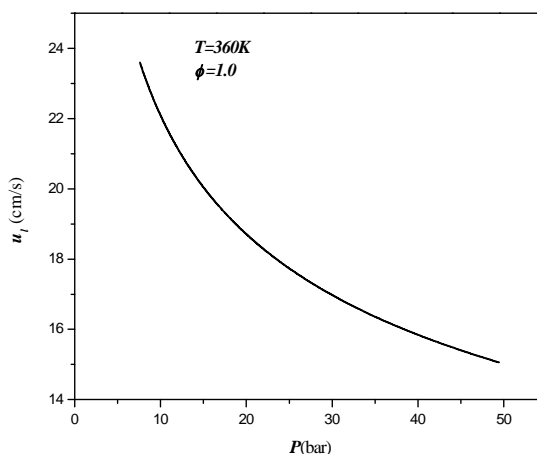
$$\phi = \frac{P_{NG} M_{NG}}{\alpha_s (P_{tot} - P_{NG}) M_a} \quad (1)$$

که در آن P_{NG} و P_{tot} بترتیب فشار جزئی گاز طبیعی و فشار کل؛ M_{NG} و M_a جرم مولکولی متوسط گاز طبیعی و هوا و

۴-۴- نمودار وابستگی سرعت سوختن آرام به فشار در دمای ثابت

برای بررسی تغییرات سرعت سوختن آرام بر حسب فشار از رابطه‌ی همبستگی حاصله در دمای ثابت 360K استفاده شد. با این فرض رابطه‌ی همبستگی به صورت زیر ظاهر شد:

$$u_f = 38.4P^{-0.24} \quad (27)$$



شکل ۷- تغییرات سرعت سوختن نسبت به فشار در دمای ثابت.

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود با افزایش فشار، سرعت سوختن روند نزولی به خود می‌گیرد. تا فشار ۱۵ bar آهنگ نزولی سرعت سوختن آرام زیاد است و رفته رفته این روند کاهش می‌یابد.

۴-۵- مقایسه‌ی سرعت سوختن آرام در حالت دما ثابت

در دمای ثابت 330K و نسبت هم ارزی ۱ معادله‌ی همبستگی لیاوو و ولی به صورت زیر درمی‌آیند و مقایسه آنها در شکل ۸ آمده است:

$$u_f = 45.86P^{-0.398} \quad (28)$$

$$u_f = 41.976P^{-0.374} \quad (29)$$

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج و بررسی‌های بعمل آمده می‌توان موارد زیر را نتیجه‌گیری کرد:

- روش تشریح شده که بر پایه‌ی فشار اندازه‌گیری شده است در فشارهای بالاتر از فشار اولیه برآورد خوبی از سرعت سوختن دارد.

¹Uncertainty analysis

آرام	l
گاز طبیعی	NG
کل	tot
نسوخته	u

مراجع

- [1] Miao, Haiyan. Jiao, Qi. Haung, Zuohua. Jiang, Deming. "Measurement of laminar burning velocities and Markstein lengths of diluted hydrogen-enriched natural gas", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 34, Issue 1, pp.507-518, 2009.
- [2] Liao, S.Y., Jiang, D.M., Huang, Z.H., Zeng, K., Cheng, Q. "Determination of the laminar burning velocities for mixtures of ethanol and air at elevated temperatures", Applied Thermal Engineering, Vol. 27, Issue 2-3, pp. 374-380, 2007.
- [3] Liao, S.Y., Jiang, D.M., Cheng, Q. "Determination of laminar burning velocities for natural gas", Fuel, Vol. 83, Issue 9, pp. 1247-1250, 2004.
- [4] Fengwang, shuang. Zhang, Hai. Jarosinski, Jozef. Gorczakowski, Andrzej. PodfilipskJerzy, "Laminar burning velocities and markstein lengths of premixed methane/air flames near the lean flammability limit in microgravity", Vol. 157, Issue 4, pp. 667-675, 2010.
- [5] Lefebvre, A.H. "Gas turbine combustion", Taylor & Francis, Second edition, P.38, 1999.
- [6] Saeed, Kh. Stone, C.R. "Measurement of the laminar burning velocity for mixtures of methanol and air from a constant-volume vessel using a multizone model", Combustion and Flame, Vol. 139, Issue 1-2, pp. 152-166, 2004.
- [7] X.J.Gu., M.Z.Haq., M. Lawes., R. Woolley. "Laminar velocity and markstein lengths of methane-air mixtures", Combustion and Flame, Vol. 121, Issue 1-2, pp. 41-58, 2000.
- [8] Pareja, Jhon., Burbano, Hugoy and Ogami, Yasuhiro "Measurements of the laminar burning velocity of hydrogen-air premixed flames", Hydrogen Energy, Vol. 35, Issue 4, pp. 1812-1818, 2010.
- [9] Heywood, J.B. "Internal Combustion Engines Fundamentals", McGraw-Hill Books Co., New York, 1988.

α_s نسبت سوخت به هوای استوکیومتری است. تأثیر خطای اندازه‌گیری P_{NG} و P_{tot} روی نسبت هم‌ارزی می‌شود:

$$\Delta\phi_{P_{NG}} = \frac{\partial\phi}{\partial P_{NG}} \Delta P_{NG} \quad (2)$$

$$\Delta\phi_{P_{tot}} = \frac{\partial\phi}{\partial P_{tot}} \Delta P_{tot}$$

و حداکثر خطای ممکن در نسبت هم‌ارزی می‌شود:

$$\Delta\phi = \sqrt{(\Delta\phi_{P_{NG}})^2 + (\Delta\phi_{P_{tot}})^2} \quad (3)$$

با فرض $\Delta P_{tot} = \Delta P_{NG} = \Delta P$ حداکثر انحراف در نسبت هم‌ارزی می‌شود:

$$\Delta\phi = \frac{M_{NG} \sqrt{P_{tot}^2 + P_{NG}^2}}{\alpha_s M_a (P_{tot} - P_{NG})^2} \Delta P \quad (4)$$

و برای آزمایشات انجام گرفته $\Delta\phi = 0.0237$ برآورد شد. با وارد کردن آن به‌همراه سایر خطاهای در داده‌های ورودی برنامه می‌توان حداکثر و حداقل انحراف ناشی از اندازه‌گیری را در سرعت سوختن بدست آورد.

نمادها

A	مساحت، m^2
M	جرم مولکولی، $kg/kmol$
m	جرم، kg
k	ثابت تعادل
P	فشار، bar
T	دما، K
u	سرعت سوختن، cm/s ، انرژی داخلی، kJ/kg
V	حجم، m^3
x	کسر مولی

نمادهای یونانی

α	مقدار ثابت
β	مقدار ثابت
ϕ	نسبت هم‌ارزی
γ	نسبت گرماهای ویژه
ρ	چگالی، kg/m^3

زیر نویس‌ها

0	مینا
b	سوخته
f	شعله