

تاثیر درصد اختلاط بنزین در مخلوط گاز طبیعی - بنزین - هوا روی سرعت سوختن لایه‌ای

ابراهیم عبدی اقدم^{۱*}، رحمان نیکوکار^۲، محسن باشی^۳

دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فنی و مهندسی، آزمایشگاه موتورهای احتراق داخلی

(نویسنده مخاطب: eaaghdam@uma.ac.ir)

چکیده

سرعت سوختن متلاطم مخلوط سوخت و هوا به سرعت سوختن لایه‌ای و مشخصه‌های تلاطم بستگی دارد. دما و فشار اولیه، نسبت هم‌ارزی مخلوط و نوع سوخت از فاکتورهای اساسی سرعت سوختن لایه‌ای هستند. در کار حاضر، از بمب حرارتی کرووی برای استخراج نتایج تجربی فشار - زمان استفاده گردید و از کد ترمودینامیکی برای محاسبه سرعت سوختن لایه‌ای استفاده شد. همچنین رابطه همبستگی برای محاسبه سرعت سوختن لایه‌ای پیشنهاد شد. سرعت سوختن مخلوط گاز طبیعی - بنزین با در صد‌های حجمی مختلف در نسبت هم‌ارزی فقیر و فشار اولیه ۷/۵bar و دمای اولیه ۳۳۳K با استفاده از داده‌های تجربی محاسبه شده است.

واژه‌های کلیدی: سرعت سوختن لایه‌ای، بمب حرارتی کرووی، مخلوط گاز طبیعی و بنزین، نسبت هم‌ارزی، رابطه همبستگی

۱- مقدمه

برای جلوگیری از آلودگی هوا می‌توان از سوخت گاز طبیعی که سوختی پاک محسوب می‌شود و در چند سال اخیر نسبت به بقیه سوخت‌های فسیلی مورد توجه بیشتر قرار گرفته است، استفاده کرد. ماهیت گاز طبیعی سبب ایجاد مشکلاتی در استفاده به عنوان سوخت در موتورها می‌شود [۱] و این موضوع ایده استفاده از یک سوخت ترکیبی به عنوان کاهنده استهلاک و افزایش توان موتور نسبت به حالت گاز سوز را ایجاد کرده است.

تانک و همکاران سرعت سوختن لایه‌ای مخلوط هیدروژن - پروپان - هوا با پیشرفت شعله کرووی را در کسرهای حجمی مختلف از هیدروژن و در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۸ تا ۱/۲ و در شرایط دما و فشار بالا مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که سرعت پیشرفت شعله بدون کشیدگی با افزایش کسر هیدروژن و دمای اولیه افزایش می‌یابد [۲].

برستیل و همکاران سرعت سوختن لایه‌ای مخلوط ایزواکتان - اتانول - بوتانول را مورد بررسی قرار دادند. میزان پتانسیل بوتانول که به ایزواکتان اضافه می‌شود و به عنوان سوخت بنزینی بکار می‌رود، با توجه به احتراق لایه‌ای مشخص شد و با اتانول مقایسه شد. با استفاده از روش انبساط کرووی شعله، تنظیم جدیدی از داده‌های سوختن لایه‌ای در یک مخزن حجم ثابت صورت گرفت. نتایج به دست آمده در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۸ تا ۱/۴ و در شرایط دمای اولیه ۴۰۰K و فشار اولیه ۱۰۰kPa نشان می‌دهد که سرعت سوختن لایه‌ای بوتانول بین سرعت سوختن لایه‌ای اتانول و ایزواکتان است و حداکثر سرعت سوختن لایه‌ای در نسبت هم‌ارزی ۱/۱ بدست می‌آید [۳].

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشکده فنی و مهندسی.

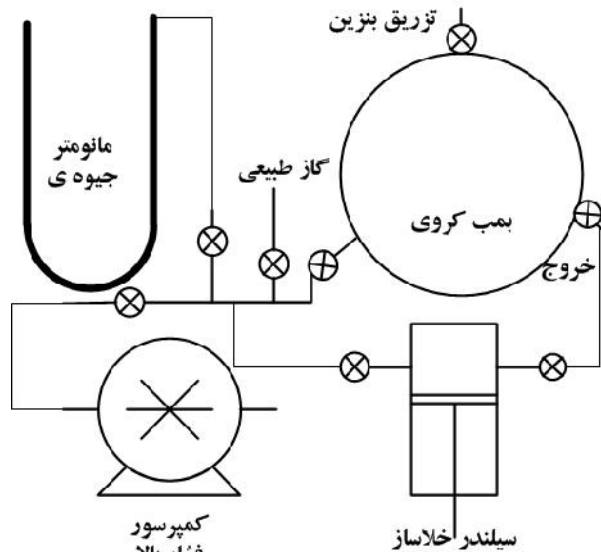
۲- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه محقق اردبیلی.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه محقق اردبیلی.

۲- تجهیزات استفاده شده

تجهیزات به کار رفته برای استحصال نتایج شامل بر: یک بمب کروی فولادی، ترانسدیوسر فشار دینامیک (نوع کیسلر^۱) مدل 6052C با قابلیت ثبت تا فشار ۲۰۰ bar و تحمل حداکثر دمای 400°C ، ترانسدیوسر فشار مطلق (نوع کیسلر) مدل 4005F با قابلیت ثبت تا فشار ۲۰ bar و یک ترموکوپل نوع k (ساخت شرکت ATBIN) با دامنه کاری 200°C - 0°C بوده است. برای رسیدن به نسبت هم‌ارزی و مقدار گاز استفاده شده از یک سیلندر خلاساز دستی با کورس ۲۵cm و قطر ۵cm استفاده شده است.

احتراق مخلوط توسط سیستم جرقه‌زنی مبتنی بر جریان مستقیم و یک کوئل صورت می‌گیرد. توجه شود که انرژی جرقه ایجاد شده باید بیش از مقدار حداقل انرژی مورد نیاز برای احتراق بنزین یا گاز طبیعی خالص باشد. مقادیر پایه در دمای 20°C و فشار ۱ bar برای گاز طبیعی برابر با 0.28mJ و برای بنزین 1.35mJ می‌باشد [۴].



شکل ۱: نمودار شماتیک بمب احتراقی تشریح شده

با توجه به شکل ۱، در ابتدای آزمایش بمب کروی توسط هوای فشرده تمیز شد. برای اطمینان از تمیز شدن کامل، خروجی بمب به یک آنالیزور محصولات احتراق متصل گردید، به نحوی که اگر آنالیزور کسر حجمی O خروجی را برابر با مقدار آن در هوای محیط نشان می‌داد در آن صورت داخل بمب هوا خالص تلقی می‌شد. برای اختلاط کامل در طی این مرحله به دفعات مسیر ورودی هوا باز و بسته می‌شد تا تلاطم کافی در محفظه ایجاد شود، همچنین امتداد ورودی و خروجی به نحوی طراحی شده که امکان خروج مستقیم هوا از ورودی بدون چرخش در داخل بمب ممکن نبود. سپس شیر هوای ورودی و خروجی بسته و محفظه به وسیله سیلندر خلاساز تا فشار 0.4bar تخلیه شد. پس از آن شیر گاز طبیعی به خط ورودی متصل و بمب تا فشار خط گاز پر گردید. سپس دوباره ورودی بسته شد و توسط سیلندر خلاساز فشار داخل بمب به 0.4bar تقلیل داده شد، این روند بر اساس فشار جزئی گاز طبیعی و هوا تا ۱۱ مرتبه برای اطمینان از پر شدن کامل محفظه با گاز طبیعی با دقت مناسب انجام گرفت. بر اساس فشار داخل بمب مقدار گاز طبیعی لازم برای تامین نسبت هم‌ارزی مورد نظر در فشار اولیه

¹ Kistler

مشخص را تنظیم می‌کنیم. در چنین شرایطی فشار داخل محفظه بمب پایین‌تر از محیط است. مقدار بنزین مورد نظر برای دست یابی به نسبت حجمی سوخت گاز طبیعی و بنزین در نسبت هم‌ارزی مورد نظر در فشار مد نظر مشخص است. در چنین شرایطی بنزین توسط سرنگ میکرولیتر از طریق یک روزنه تعبیه شده به داخل محفظه تزریق می‌شود (امکان خروج بنزین یا گاز به علت پایین‌تر بودن فشار داخل بمب ممکن نمی‌باشد) و پس از تزریق سوخت به سرعت شیر مربوطه بسته می‌شود. سپس شیر خط ورودی هوای فشار بالا باز شده تا مقدار فشار داخل محفظه به فشار اولیه در دمای اولیه برسد. در این شرایط مخلوط داخل محفظه از لحاظ کمی تنظیم شده است. برای همگن شدن مخلوط ۵ دقیقه و برای برقرار شدن شرایط آرام در محفظه نیز ۵ دقیقه صبر می‌کنیم (در مجموع ۱۰ دقیقه) [۵]. بعد از خاتمه زمان انتظار، با زدن دکمه جرقه مخلوط محترق شده و نتایج تغییرات فشار با فرکانس مشخص توسط نرم‌افزار^۱ ذخیره می‌شود. این داده‌ها به عنوان ورودی به کد کامپیوتری تعریف شد تا سرعت سوختن لایه‌ای محاسبه شود.

۳- معادله همبستگی

فشار مطلق آزمایشگاه در حین انجام آزمایشات ۸۶kPa (معادل ۰/۸۶bar) اندازه‌گیری شده است. کلیه تست‌ها در دمای اولیه ۳۳۳K و فشار اولیه ۷/۵bar صورت گرفته است. داده‌های گزارش شده مربوط به دو نسبت هم‌ارزی ۰/۹ و ۰/۹۵ بوده و سرعت سوختن لایه‌ای بر اساس این داده‌ها محاسبه شده است. رابطه همبستگی برای سرعت سوختن لایه‌ای برای مخلوط سوخت گاز طبیعی - بنزین با هوا و درصدهای حجمی مختلف با استفاده از روش کمترین مربعات بدست آمده است و تحلیل نمودارها بر اساس این رابطه همبستگی انجام گرفته است. عبارت ۱ رابطه همبستگی پیشنهادی را توصیف می‌کند:

$$u_l = u_{l,0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\gamma} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\delta} \quad (1)$$

در رابطه ۱ P_0 و T_0 به ترتیب فشار و دمای مرجع می‌باشند که در آزمایشات صورت گرفته برابر با ۷/۵bar و ۳۳۳K در نظر گرفته شده است، $u_{l,0}$ سرعت سوختن لایه‌ای و $u_{l,0}$ و δ ثوابت رابطه پیشنهادی هستند. مقادیر γ و $u_{l,0}$ از جدول ۱ بدست می‌آید.

جدول ۱: مقادیر γ و $u_{l,0}$ برای نسبت‌های هم‌ارزی فقیر

نسبت هم‌ارزی	در صد حجمی گاز طبیعی	در صد حجمی بنزین	$u_{l,0}$	γ
۰/۹	۲۵	۷۵	۱۵/۵	۲/۵۱
	۵۰	۵۰	۱۶/۱۵	۲/۵۲
	۷۵	۲۵	۱۶/۷	۲/۵
	۱۰۰	۰	۱۹/۹۵	۳/۷
۰/۹۵	۲۵	۷۵	۱۸/۲۲	۲/۵۹
	۵۰	۵۰	۱۶/۱۵	۲/۵۲
	۷۵	۲۵	۱۸/۸۱	۲/۵۳
	۱۰۰	۰	۲۰/۳۹	۳/۶۷

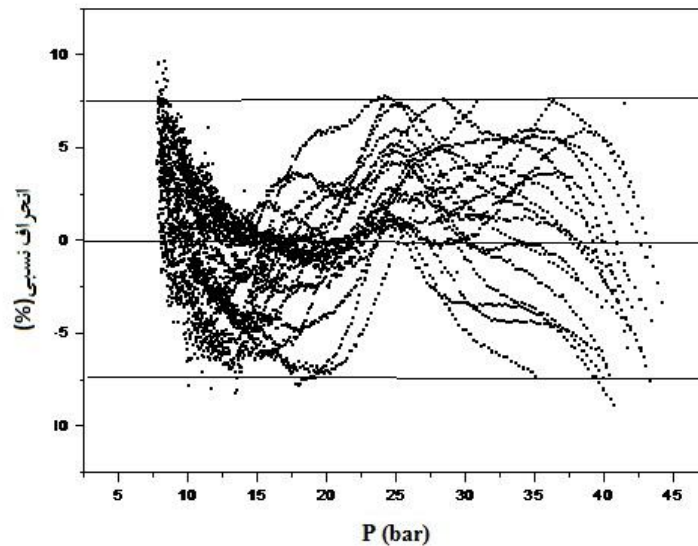
¹ AD-LOGGER DAQ2008

۴- میزان انحراف رابطه همبستگی

میزان انحراف رابطه همبستگی پیشنهاد شده در عبارت ۱ با مقدار محاسبه شده از طریق کد، با استفاده از رابطه ۲ بدست آمده است:

$$\Delta u_1 = \frac{|u_{1,cal} - u_{1,cod}|}{u_{1,cal}} \times 100 \quad (2)$$

شکل ۲ پراکندگی انحراف رابطه همبستگی از مقدار محاسبه شده از طریق کد را بیان می‌کند. این نمودار برای ۵۲۳۲ داده رسم شده است. طبق این نمودار، حداکثر انحراف سرعت سوختن لایه‌ای محاسبه شده از طریق کد کامپیوتری با رابطه همبستگی پیشنهاد شده تقریباً $\pm 7/5$ می‌باشد و انحراف نسبی بیشتر در فشارهای پایین، به خاطر بالا بودن تغییرات شعاع شعله به تغییرات فشار است. میانگین انحراف در این تست $\pm 2/691$ می‌باشد.



شکل ۲: میزان انحراف سرعت سوختن لایه‌ای محاسبه شده از طریق کد با رابطه همبستگی پیشنهادی

۵- اثر تغییر دما و فشار

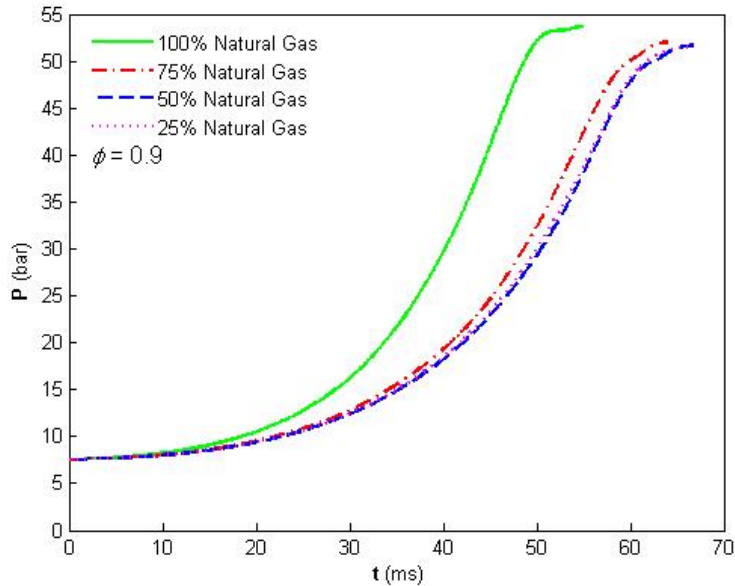
برای مطالعه اثر تغییر دما و فشار روی سرعت سوختن شعله از رابطه ۱ به ترتیب با فرض فشار ثابت و دما ثابت در طول احتراق استفاده می‌کنیم. روابط ۳ و ۴ بر این اساس بیان شده‌اند و ثوابت ϵ و $u_{1,0}$ از جدول ۱ بدست می‌آیند.

$$u_1 = u_{1,0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^\epsilon \quad (3)$$

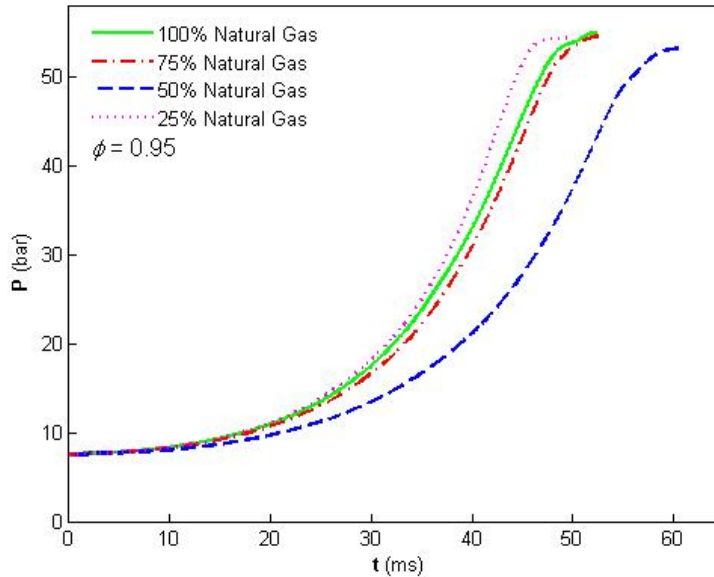
$$u_1 = u_{1,0} \left(\frac{P}{P_0} \right)^\epsilon \quad (4)$$

۶- تغییرات فشار بر حسب زمان

با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ فشار درون بمب در طول احتراق به طور پیوسته افزایش می‌یابد و بالاترین فشار در هر دو نسبت هم‌ارزی مربوط به گاز طبیعی خالص است.



شکل ۳: تغییرات فشار بر حسب زمان در حین احتراق مخلوط گاز طبیعی-بنزین هوا در درصدهای حجمی مختلف در نسبت هم‌ارزی ۰/۹



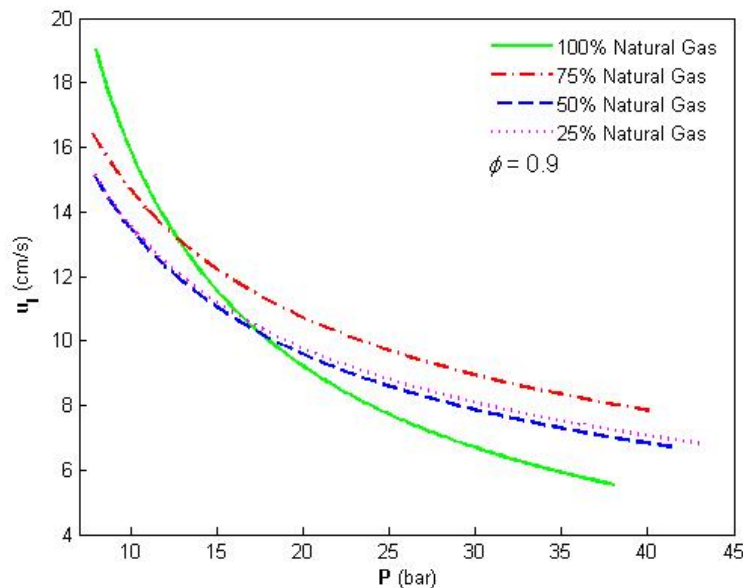
شکل ۴: تغییرات فشار بر حسب زمان در حین احتراق مخلوط گاز طبیعی-بنزین هوا در درصدهای حجمی مختلف در نسبت هم‌ارزی ۰/۹۵

۷- تغییرات سرعت سوختن ورقه‌ای بر حسب فشار

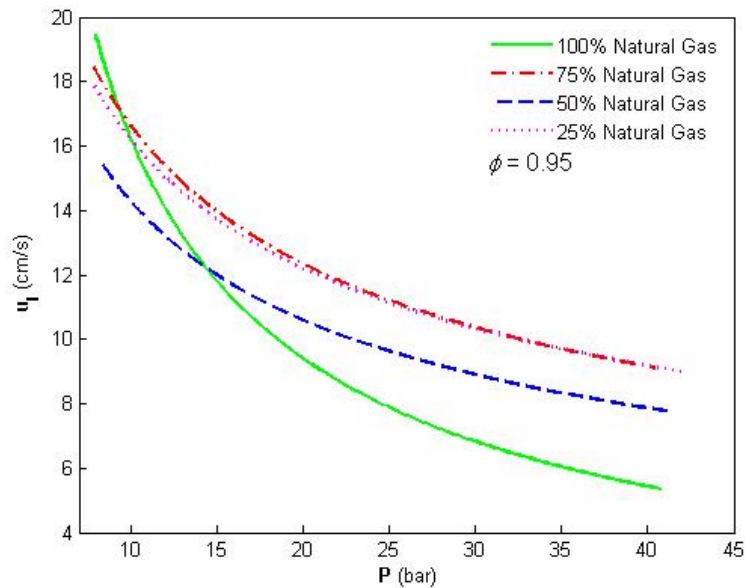
برای محاسبه سرعت سوختن ورقه‌ای از یک مدل احتراقی استفاده شده است. مدل احتراقی به کار رفته در این کار یک مدل ترمودینامیکی دو منطقه‌ای با مفروضات زیر است:

- فضای بمب به دو منطقه سوخته و نسوخته تقسیم می‌شود.
- ترکیب منطقه نسوخته ثابت و منطقه سوخته در تعادل شیمیایی است.
- توزیع مکانی دما در هر منطقه یکنواخت است.
- از انتقال گرما بین دو منطقه و جداره بمب طی پریود احتراق صرف‌نظر می‌شود.
- رشد منطقه‌ی سوخته کروی و به مرکزیت مرکز بمب (محل جرقه شمع) است.
- تمامی گونه‌های موجود در دو منطقه گاز کامل‌اند.
- تراکم منطقه نسوخته 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).

مدل ترمودینامیکی در قالب یک کد به زبان فرترن نوشته شده است و با دریافت نوع سوخت، نسبت هم‌ارزی، فشار و دما و همچنین تغییرات فشار ثبت شده به همراه فرکانس اخذ داده‌ها بصورت ورودی به انجام محاسبات مربوطه می‌پردازد [۶]. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ در حالت دما ثابت ابتدا با افزایش فشار سرعت سوختن لایه‌ای کاهش می‌یابد، همچنین تا فشار ۱۲/۵bar سرعت سوختن لایه‌ای گاز طبیعی خالص بیشتر از سایر مخلوط‌ها می‌باشد و همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش فشار، سرعت سوختن لایه‌ای گاز طبیعی خالص با شیب بیشتری نسبت به سایر مخلوط‌ها کاهش می‌یابد بطوری که از فشار بیشتر از ۱۷/۵bar کمترین سرعت سوختن لایه‌ای مربوط به گاز طبیعی خالص می‌باشد.



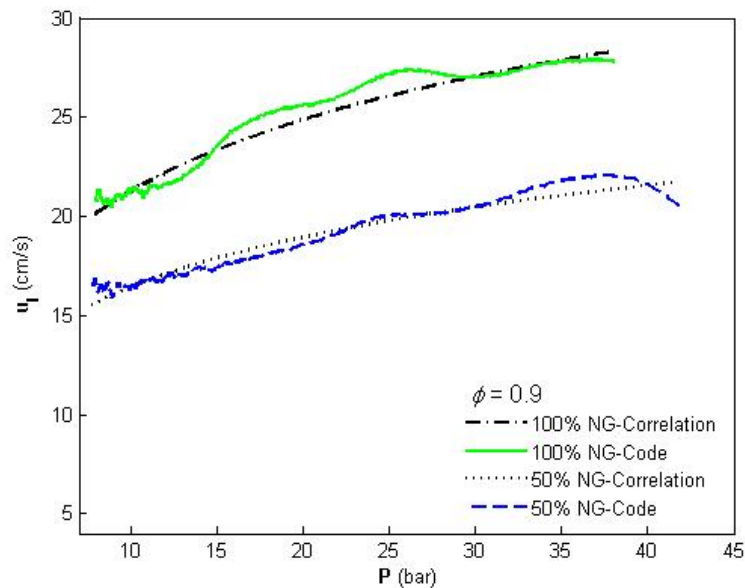
شکل ۵: نمودار سرعت سوختن لایه‌ای بر حسب فشار در حالت دما ثابت برای مخلوط‌های گاز طبیعی-بنزین هوا در نسبت هم‌ارزی



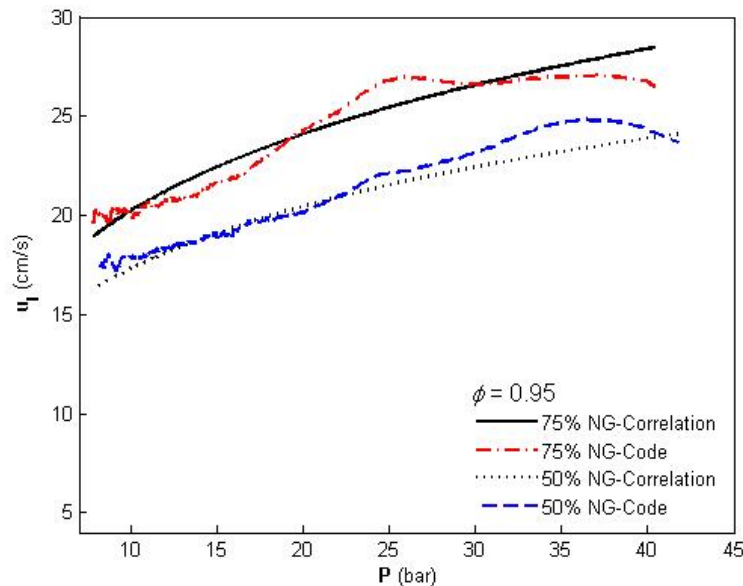
شکل ۶: نمودار سرعت سوختن لایه‌ای بر حسب فشار در حالت دما ثابت برای مخلوط‌های گاز طبیعی-بنزین هوا در نسبت هم‌ارزی ۰/۹۵

۸- برازش منحنی با استفاده از رابطه همبستگی

شکل‌های ۷ و ۸ نمودار سرعت سوختن لایه‌ای تعیین شده بر حسب فشار داخل بمب را به همراه مقادیر حاصله از رابطه همبستگی در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۹ و ۰/۹۵ نمایش می‌دهند.



شکل ۷: نمودار مقایسه سرعت سوختن لایه‌ای بر حسب فشار بمب حاصله از رابطه همبستگی با سرعت سوختن لایه‌ای بر حسب فشار بمب حاصله از کد کامپیوتری در نسبت هم‌ارزی ۰/۹



شکل ۸: نمودار مقایسه سرعت سوختن لایه‌ای بر حسب فشار بمب حاصله از رابطه همبستگی با سرعت سوختن لایه‌ای بر حسب فشار بمب حاصله از کد کامپیوتری در نسبت هم‌ارزی ۰/۹۵

۹- نتیجه‌گیری

- در نمودارهای تغییرات فشار بر حسب زمان در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ و ۰/۹۵ برای مخلوط گاز طبیعی-بنزین با هوا مشاهده می‌شود در طول احتراق، فشار درون بمب حرارتی افزایش می‌یابد و بالاترین فشار مربوط به گاز طبیعی خالص است.
- در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ برای مخلوط گاز طبیعی-بنزین با هوا مشاهده می‌شود که سرعت سوختن لایه‌ای گاز خالص ابتدا و تا فشار ۱۲/۵bar بیشتر از سایر مخلوط‌ها می‌باشد و همچنین ملاحظه شد که با افزایش فشار، سرعت سوختن لایه‌ای گاز طبیعی خالص با شیب بیشتری نسبت به سایر مخلوط‌ها کاهش یافت بطوری که از فشار بیشتر از ۱۷/۵bar، کمترین سرعت سوختن لایه‌ای مربوط به گاز طبیعی خالص است.
- در نمودار سرعت سوختن لایه‌ای با تغییرات فشار در نسبت هم‌ارزی ۰/۹۵ برای مخلوط گاز طبیعی-بنزین با هوا مشاهده می‌شود که در حالت دما ثابت با افزایش فشار سرعت سوختن لایه‌ای کاهش می‌یابد و در این نسبت هم‌ارزی بالاترین سرعت سوختن لایه‌ای مربوط به مخلوط ۷۵ گاز طبیعی و ۲۵ بنزین است و پس از آن مخلوط ۲۵ گاز طبیعی و ۷۵ بنزین قرار دارد.

مراجع

- 1- Hu, E., Huang, Z., Zheng, J., Li, Q. and He, J., 2009. "Numerical study on laminar burning velocity and NO formation of premixed methane-hydrogen-air flames". Hydrogen energy, 34, pp. 6545-6557.
- 2- Tank, C., He, J., Huang, Z., Jin, C., Wang, X. and Miao, H., 2008. "Measurements of laminar burning velocity and Markstein lengths of propane - hydrogen - air mixture at elevated pressures and temperatures". International journal of hydrogen energy, 33, pp. 7274-7285.
- 3- Broustail, G., Seers, P., Halter, G., Moreac, F. and Mounaim-Rousselle, C., 2011. "Experimental determination of laminar burning velocity for butanol and ethanol iso-octane blends". Fuel, 90, pp. 1-6.
- 4- Kaiser, K. L., 2004, *Electromagnetic Compatibility Handbook*, CRC Press, Michigan, pp. 27:82.



پنجمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران
تهران - دانشگاه علم و صنعت ایران - بهمن ماه ۱۳۹۲



5- Mandilas, C., Ormsby, M.P., Sheppard, C.G.W. and Woolley, R., 2007, "*Effects of hydrogen addition on laminar and turbulent premixed methane and iso-octane-air flames*". Proceedings of the Combustion institute, 31, pp. 1443-1450.

۶- عبدی اقدم، ابراهیم، حسینی اصل، سید میثم، ۱۳۹۰، "مطالعه تجربی سرعت سوختن مخلوط گاز طبیعی-هوا با شرایط اولیه آرام"، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۴۱، ص. ۳۰-۲۳.