

## «یادداشت فنی»

# تعیین سرعت شعله آرام پیش‌آمیخته سوخت‌های گازی به روش شار حرارتی

نیما طینتی<sup>۱</sup>، مسعود نادافیان بجزستانی<sup>۲</sup>، حمید ممهدی هروی<sup>۳</sup>، جواد ابوالفضلی اصفهانی<sup>۴</sup> و کاظم بشیرنژاد<sup>۵</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، nimatinati@hotmail.com

۲- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، masoud.nadafian@mshdiau.ac.ir

۳- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد (نویسنده مخاطب)، heravimh@mshdiau.ac.ir

۴- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، abolfazli@um.ac.ir

۵- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، bashirmezhad@yahoo.com

(دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۲۳، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۲/۳/۲، پذیرش: ۹۲/۶/۳)

در این تحقیق، سرعت سوختن آرام شعله‌های متان-هوا و پروپان-هوا در گستره وسیعی از نسبت‌های هم‌ارزی و در فشار اتمسفر به‌طور آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده است. روش شار حرارتی برای اندازه‌گیری سرعت سوختن استفاده شد. آزمایش‌ها برای متان-هوا و پروپان-هوا در نسبت‌های مختلف هم‌ارزی انجام شد. حد اکثر سرعت شعله برای متان-هوا و پروپان-هوا در نسبت هم‌ارزی ۱/۱ و به ترتیب ۳۷/۳۳ و ۴۲/۱ cm/s اندازه‌گیری شد. نتایج با داده‌های معتبر منتشرشده تطابق قابل قبولی دارند. شبیه‌سازی با استفاده از کد پیش‌آمیخته نرم‌افزار کمکین ۲ انجام گرفت و سازوکارهای شیمیایی GRI-Mech 3.0 و دانشگاه پرینستون به ترتیب برای احتراق متان و پروپان در نظر گرفته شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی تطابق خوبی را نشان می‌دهند.

**کلیدواژگان:** سرعت شعله، آرام، پیش‌آمیخته، روش شار حرارتی، شبیه‌سازی عددی

## مقدمه

سرعت شعله آرام از مهم‌ترین پارامترها جهت تجزیه و تحلیل و پیش‌بینی فرآیندهای احتراقی است که به‌عنوان مثال در طراحی مشعل و محفظه احتراق توربین‌های گازی و پیش‌بینی انفجار از آن استفاده می‌شود [۲،۱]. همچنین، از سرعت‌های شعله اندازه‌گیری‌شده جهت اعتبارسنجی سازوکارهای سینتیک شیمیایی استفاده می‌شود [۳].

پدیده‌هایی شبیه کشیدگی شعله و اتلاف حرارتی شعله، اندازه‌گیری سرعت شعله را تحت تاثیر قرار می‌دهند. به‌عنوان مثال، برای آنکه شعله در موقعیتی خاص ثابت نگه داشته شود، باید سرعت گازهای نسوخته ( $U_g$ ) برابر سرعت شعله ( $S_L$ ) باشد که این امر موجب اتلاف حرارت از شعله به مشعل می‌شود و در نتیجه شعله بی‌دررو نخواهد بود [۵،۴]. ایجاد حالت ایدئال برای اندازه‌گیری سرعت شعله دشوار است و تنها یکی از شروط بی‌دررو بودن و کشیده نبودن توسط روش‌های اندازه‌گیری سرعت شعله که در گذشته استفاده شده ارضاء شده است، ولی در روشی به نام روش شار حرارتی<sup>۱</sup> که از طریق تغییرات دمایی ایجاد شده توسط شعله بر روی سطح یک مشعل، به محاسبه سرعت شعله می‌پردازد، هر دو شرط ارضاء می‌شود.

ایده ابتدایی روش شار حرارتی، که شعله تخت ایجاد می‌کند، توسط دی گوی و ون مارن [۶] ارائه شده است. آن‌ها افزایش دمایی آبی که برای سردکردن مشعل صفحه متخلخل استفاده می‌شد را اندازه گرفتند که این افزایش دما بر اثر دریافت گرما از

شعله بود. با تغییر سرعت گازهای نسوخته، به نحوی که دیگر افزایش دمایی در آب رخ ندهد، سرعت شعله بی‌دررو را محاسبه کردند. یک مشکل در روش آن‌ها ناچیز بودن افزایش دمای آب و مشکل دیگر عدم امکان ایجاد شعله کاملاً بی‌دررو بود، زیرا شعله در شرایط بی‌دررو ناپایدار شده و خاموش می‌شود [۶]. روش شار حرارتی توسط بوسکارت [۷] بهبود بخشیده شد و او با اندازه‌گیری توزیع دما روی صفحه مشعل و ایجاد موقعیت بی‌دررو با برونیابی نتایج در چندین سرعت مختلف، برای حالتی که دفع حرارت به صفحه مشعل وجود نداشته باشد، سرعت شعله را محاسبه کرد. کنو [۸] با استفاده از روش شار حرارتی تاثیر فشار بر سرعت شعله متان-هیدروژن-هوا را در فشارهای پایین بررسی کرد و نشان داد که با افزایش فشار، سرعت شعله آرام کاهش می‌یابد و یک رابطه تجربی برای سرعت شعله برحسب فشار ارائه نمود. در تحقیقی دیگر، کنو تاثیر دما بر سرعت شعله متان-هوا و هیدروژن-هوا را در فشار اتمسفر بررسی کرد و رابطه‌ای تجربی بین سرعت شعله و دما ارائه کرد [۹].

در این پژوهش با روش شار حرارتی سرعت شعله پیش‌آمیخته آرام بی‌دررو متان-هوا و پروپان-هوا در فشار اتمسفر، دمای ورودی  $300\text{ K}$  و نسبت هم‌ارزی  $0/6$  تا  $1/3$  اندازه‌گیری شده است. برای صحت‌گذاری نتایج آزمایش، از مقایسه آنها با شبیه‌سازی عددی انجام‌شده توسط کد پیش‌آمیخته [۱۰] نرم‌افزار کمکین<sup>۲</sup> [۱۱] و نیز نتایج سایر محققان [۷] استفاده شده است.

## چیدمان آزمایشگاهی

در طراحی مشعل مورد استفاده در این پژوهش از ابعاد بهینه، که توسط بوسکارت و همکارانش [۷] پیشنهاد شد، استفاده شده است. جنس مشعل از برنج انتخاب شده، زیرا برنج ضریب انتقال حرارت رسانشی بالایی دارد. سر بالایی مشعل خود شامل سه قسمت مجزاست که عبارت‌اند از یک صفحه سوراخ‌دار و دو قسمت برای گردش آب گرم و سرد. محل ورود و خروج آب گرم با دمای  $85^{\circ}\text{C}$  در بالا و محل ورود و خروج آب سرد با دمای  $27^{\circ}\text{C}$  در پایین قرار دارد. جهت عدم انتقال حرارت قسمت بالایی به قسمت پایین، یک تفلون از جنس PTFE بین این دو قسمت گذاشته شده است. دلیل چرخش آب گرم در قسمت بالایی مشعل آن است که صفحه سوراخ‌دار قرار گرفته بر روی سطح بالایی مشعل تا دمایی معین گرم شده و شرایطی فراهم می‌آورد که شعله ایجادشده بر روی سطح مشعل امکان جذب گرما از سطح مشعل را دارا بوده و از این طریق میزان حرارت داده شده از سطح مشعل به شعله قابل کنترل باشد. در شکل ۱، قسمت‌های مختلف مشعل آزمایشگاهی ساخته‌شده نشان داده شده است.

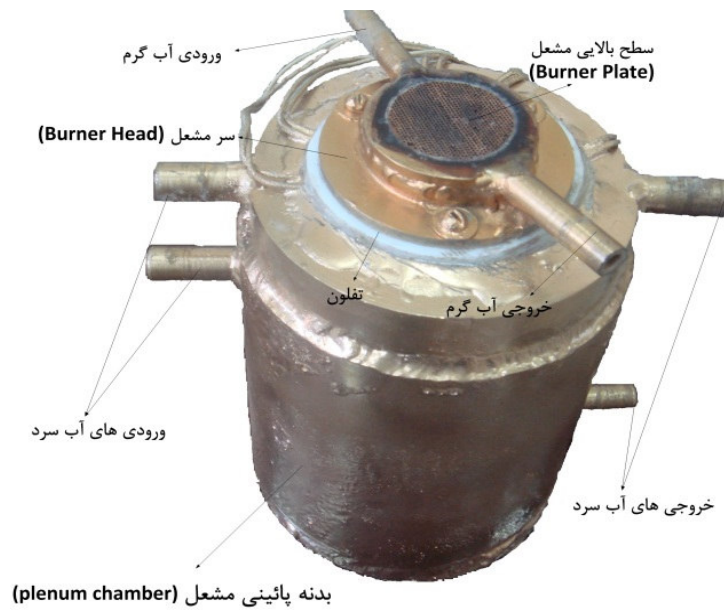
قسمت پایینی مشعل به صورت دو محفظه است که در داخل یکدیگر قرار گرفته‌اند و به اصطلاح محفظه تو در تو<sup>۳</sup> نامیده می‌شود. بین این دو محفظه، آب سرد جریان داشته و از این جریان سیال برای تنظیم دمای ورودی مخلوط گازهای نسوخته و هوا استفاده می‌شود. ارتفاع این محفظه  $150\text{ mm}$  بوده و در فاصله  $14\text{ mm}$  از قسمت انتهایی آن یک صافی قرار گرفته که قطر سوراخ‌های آن  $5\text{ mm}$  است. از این صافی جهت یکنواخت کردن نسبی جریان نسوخته گاز و هوا قبل از ورود آن به صفحه سوراخ‌دار اصلی، که در بالای مشعل قرار گرفته است، استفاده می‌شود. محل ورود مخلوط نسوخته سوخت-هوا از قسمت ورودی پایین محفظه است. همچنین، دو لوله قرار گرفته در قسمت‌های راست و چپ به ترتیب برای ورود و خروج جریان آب سرد در نظر گرفته شده است.

صفحه سوراخ‌داری که در بالاترین قسمت مشعل قرار گرفته است دایره‌ای به قطر  $32\text{ mm}$  و ضخامت  $3\text{ mm}$  است که بر روی آن بالغ بر  $1000$  سوراخ به قطر  $0/5\text{ mm}$  ایجاد شده است. قطر سوراخ‌هایی که برای ایجاد شعله تخت مخلوط سوخت و هوا لازم است، توسط سرعت جریان گازهای نسوخته و در نتیجه بازه سرعت سوختن مخلوط تعیین می‌شود.

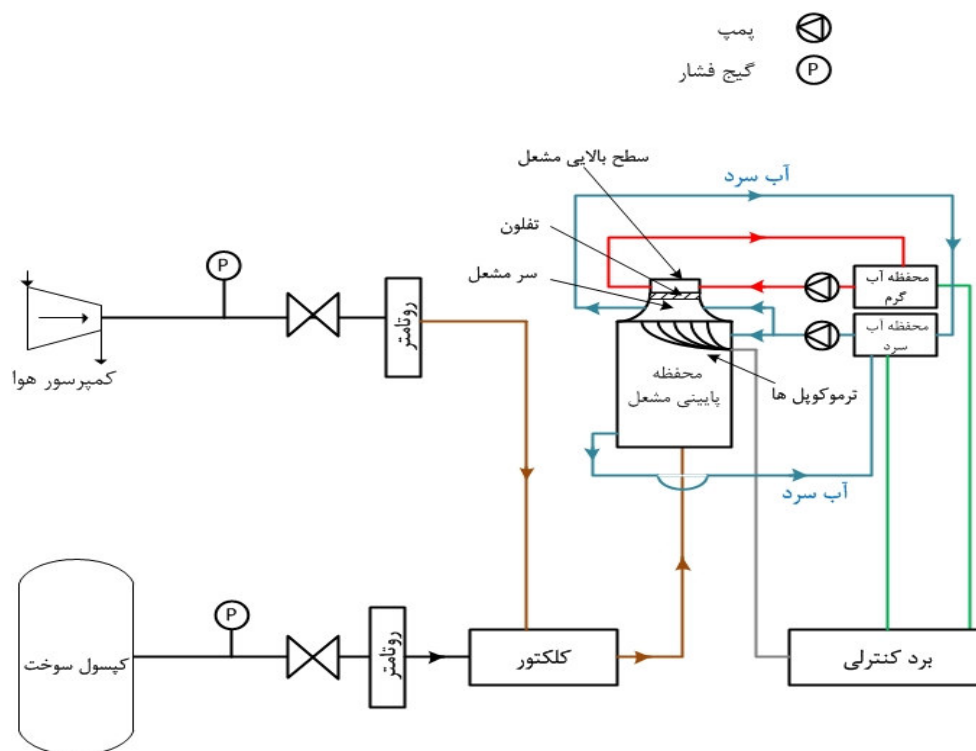
طرحواره مجموعه وسایل آزمایشگاهی مورد استفاده جهت اندازه‌گیری سرعت سوختن شعله آرام مسطح بی‌دررو در شکل

۲ مشاهده می‌شود.

1. Premixed Code  
2. Chemkin 2  
3. Plenum Chamber



شکل ۱- قسمت های مختلف مشعل آزمایشگاهی ساخته شده



شکل ۲- طرحواره اجزاء مورد استفاده و نحوه ارتباط آن ها با یکدیگر

همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، مخزن آب سرد به مشعل متصل بوده و از طریق گردش دائمی آب سرد، به دور قسمت پایینی مشعل، دمای مخلوط پیش آمیخته سوخت و هوا به وسیله انتقال حرارت بین بدنه مشعل و مخلوط گازی عبوری قابل تنظیم خواهد بود. مخزن آب گرم برای گردش دائمی آب گرم به دور قسمت بالایی مشعل مورد استفاده قرار گرفته

تا شرایطی فراهم آید که شعله ایجاد شده بر روی سطح مشعل امکان جذب گرما از سطح مشعل را داشته باشد. همچنین، دمای این مخازن هر لحظه از طریق صفحه کنترل قابل مشاهده است. سیم‌های ترموکوپل نوع K، پس از اتصال به سطح بالایی مشعل، به صفحه کنترل برای نمایش لحظه‌ای دما وارد می‌شوند. دقت نمایشگرهای دما ۱°C است. منبع سوخت به صورت کپسول بوده و هوا از طریق یک کمپرسور تأمین می‌شود. در مسیر هر یک از منابع سوخت و هوا یک روتامتر جهت تنظیم دبی قرار داده شده است. دقت اندازه‌گیری دبی در روتامتر سوخت برابر ۲/۵ درصد مقیاس کامل است که محدوده اندازه‌گیری آن ۶ تا ۶۰ Lit/hr و برای هوا برابر با ۲/۵۷ درصد مقیاس کامل بوده که محدوده اندازه‌گیری آن ۵۰ تا ۵۰۰ cm<sup>3</sup>/s است.

## مبانی روش شار حرارتی

روش شار حرارتی بر مبنای اندازه‌گیری اتلاف خالص حرارت از شعله به مشعل و تنظیم سرعت گازهای نسوخته، به مقداری که اتلاف حرارتی به مشعل صفر شود، است. توزیع دمای سطح مشعل در راستای شعاعی از طریق معادله انرژی زیر به دست می‌آید [۷]:

$$T_p(r) = T_{center} - \frac{q}{4\lambda x_p} r^2 \quad (1)$$

که در آن  $T_p$  توزیع دما در راستای شعاعی سطح مشعل،  $T_{center}$  دمای مرکز سطح مشعل،  $q$  حرارت خالص داده‌شده به سطح،  $\lambda$  ضریب هدایت حرارتی سطح مشعل،  $x_p$  ضخامت مشعل و  $r$  مختصه شعاعی است. رابطه (۱) به شکل کلی زیر نیز بیان می‌شود:

$$T_p(r) = T_{center} + \alpha r^2 \quad (2)$$

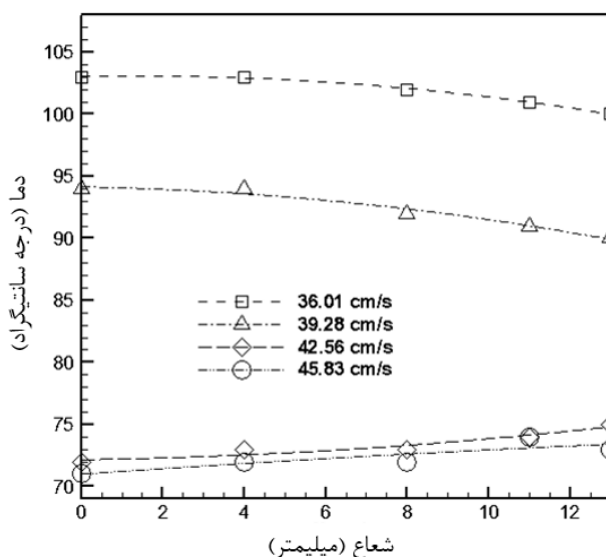
که در آن  $\alpha$  ثابت بوده و متناسب با حرارت  $q$  در رابطه (۱) است. برای هریک از تغییرات دمایی صورت گرفته در سطح مشعل، به‌ازای سرعت سوختن متناسب به آن می‌توان، بین نقاط دمایی، یک منحنی از مرتبه دوم برازش کرد که طبق رابطه (۲) یک مقدار مشخص دارد و  $\alpha$  برابر با صفر نشان‌دهنده حالتی خواهد بود که دمای تمام نقاط در راستای شعاعی با دمای مرکز برابر بوده و لذا حرارت خالص هدررفته از سطح مشعل صفر می‌شود که این حالت همان حالت بی‌دررو مطلوب است. سرعت مربوط به این حالت را می‌توان با میانمایی بین مقادیر  $\alpha$  و سرعت‌های سوختن متناسب به آن‌ها پیدا کرد.

یک شعله مسطح و آرام، برحسب دبی سوخت و هوا و بنا به خصوصیات آن، قادر خواهد بود که دو نوع مختلف تغییرات دمایی را در سطح یک مشعل ایجاد کند که در اولین مورد دمای مرکز سطح مشعل از دمای سایر نقاط در راستای شعاعی کمتر بوده که این حالت به اصطلاح مافوق بی‌دررو<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. حالت دوم وقتی اتفاق می‌افتد که دمای مرکز سطح مشعل از دمای سایر نقاط در راستای شعاعی بیشتر باشد که این حالت اصطلاحاً مادون بی‌دررو<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. حالت بی‌دررو، یک وضعیت ایدئال بین دو مورد نام‌برده در بالاست و سرعت سوختن آرام مربوط به این حالت از طریق یک درونیایی خطی حاصل خواهد شد [۱۲]. از آنجا که هدف این پژوهش به دست آوردن سرعت سوختن در حالت پایدار است، لذا سرعت گازهای نسوخته با سرعت سوختن شعله برابر است [۱۳].

روش کار بدین صورت است که در ابتدا سرعت سوختن آرام مربوط به یک نسبت هم‌ارزی از شبیه‌سازی عددی مشخص شده و معمولاً ۴ یا ۵ مقدار سرعت در یک بازه مشخص طوری در نظر گرفته می‌شود که سرعت به دست آمده از شبیه‌سازی عددی در بین این بازه قرار گیرد. سپس به‌ازای هر سرعت در نظر گرفته شده در این بازه، دبی سوخت و هوا استخراج می‌شود. حال، پس از اعمال دبی سوخت و هوا، تغییرات دمایی ایجادشده بر روی سطح مشعل ثبت شده که این تغییرات برای هر حالت متناسب به یک سرعت سوختن است (همان سرعتی که از روی آن دبی سوخت و هوا استخراج شده است). انتظار می‌رود همان‌طور که گفته شد، به‌ازای سرعت سوختن بیشتر از شبیه‌سازی عددی، دمای مرکز کمینه و به‌ازای سرعت سوختن کمتر از شبیه‌سازی عددی، دمای مرکز بیشینه باشد. چون در حالتی که سرعت در نظر گرفته شده در بازه سرعت فوق بیشتر از سرعت به دست آمده از حل عددی باشد، تغییرات دمایی ایجادشده بر روی سطح مشعل نزدیک به حالت مافوق بی‌دررو خواهد بود و

1. Superadiabatic  
2. Subadiabatic

در صورتی که این سرعت کمتر از سرعت به‌دست آمده از حل عددی باشد، تغییرات دمایی بر روی سطح مشعل در حالت مادون بی‌دررو خواهد بود [۱۲]. پس از به‌دست آوردن تغییرات دمایی به‌ازای بازه سرعت مورد نظر، بین نقاط هر حالت یک منحنی از مرتبه ۲ برازش می‌شود که این منحنی طبق رابطه (۲) یک مقدار  $\alpha$  مشخص دارد. لذا به‌ازای هر سرعت سوختن موجود در بازه فوق یک مقدار  $\alpha$  به‌دست خواهد آمد. شکل ۳ نمونه‌ای از تغییرات دمایی سطح مشعل به‌ازای ۴ سرعت شعله متفاوت است که سرعت‌های ۴۵/۸۳ cm/s و ۴۲/۵۶ cm/s نشان‌دهنده حالت مافوق بی‌دررو و سرعت‌های ۳۹/۲۸ cm/s و ۳۶/۰۱ cm/s نشان‌دهنده حالت مادون بی‌دررو است.



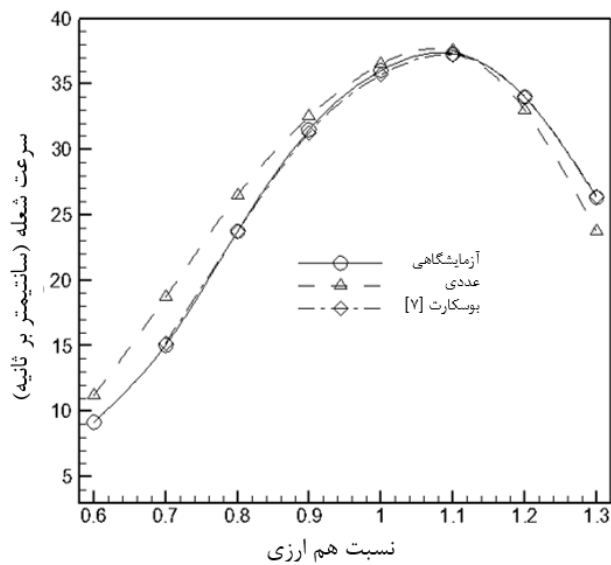
شکل ۳- تغییرات دمایی سطح مشعل به‌ازای ۴ سرعت شعله متفاوت بی‌دررو پروپان-هوا به‌ازای  $\phi = 1$  در فشار اتمسفر و دمای ورودی ۳۰۰K

با رسم یک منحنی، که محور عمودی آن  $\alpha$  و محور افقی آن سرعت سوختن باشد و سپس پیدا کردن سرعتی که به‌ازای آن  $\alpha$  برابر با صفر شود، سرعت سوختن آرام یک شعله مسطح و بی‌دررو به‌دست خواهد آمد. برای شبیه‌سازی عددی در این پژوهش، به‌دلیل استفاده از گاز متان و پروپان به‌عنوان سوخت، نیاز به یک سازوکار شیمیایی مناسب برای رسیدن به نتایج عددی مطلوب است. برای احتراق متان از سازوکار شیمیایی GRI-Mech 3.0 [۱۴]، که شامل ۵۳ گونه و واکنش شیمیایی است، استفاده شده است و برای احتراق پروپان از سازوکار شیمیایی که سانگ و همکارانش [۱۵] در دانشگاه پرینستون تهیه کرده‌اند و شامل ۹۲ گونه و ۶۲۵ واکنش شیمیایی است، استفاده شده است.

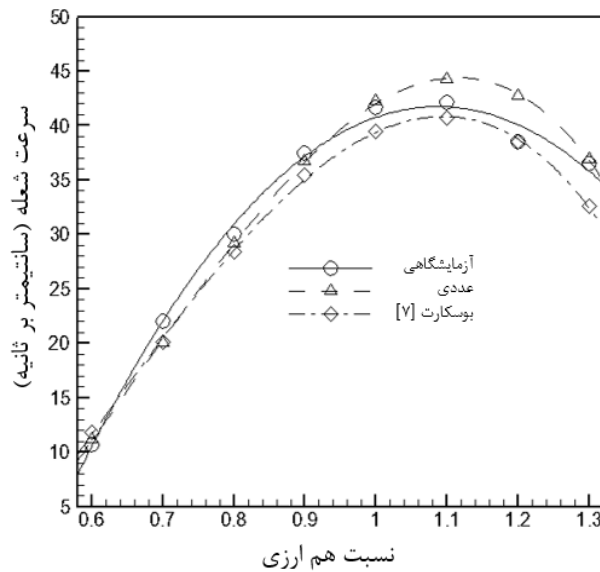
## نتایج و بحث

در این بخش، نتایج سرعت شعله آرام پیش‌آمیخته بی‌دررو مخلوط گازی متان-هوا و پروپان-هوا برای نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۶ تا ۱/۳ در فشار اتمسفر و دمای ورودی ۳۰۰K آورده شده است. شکل ۴ مقایسه سرعت شعله مخلوط متان-هوا حاصل از نتایج آزمایشگاهی و عددی انجام‌گرفته در این پژوهش با نتایج بوسکارت [۷] را نشان می‌دهد. سرعت شعله مخلوط متان-هوا از نسبت هم‌ارزی ۰/۶ تا حدود ۱/۱ افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار سرعت شعله به‌دست آمده در آزمایش‌ها برای مخلوط متان-هوا برابر با ۳۷/۳۳ cm/s و در نسبت هم‌ارزی ۱/۱ به‌دست آمده است. درصد اختلاف مقادیر آزمایشگاهی با مقادیر کار بوسکارت [۷] در نسبت‌های هم‌ارزی کمتر از ۱ به‌طور میانگین ۰/۶ درصد، در نسبت‌های هم‌ارزی بیشتر از ۱ به‌طور میانگین ۰/۲۴ درصد و در حالت استوکیومتری ۱/۶۵ درصد است.

شکل ۵ مقایسه سرعت شعله مخلوط پروپان-هوا حاصل از نتایج آزمایشگاهی و عددی انجام گرفته در این پژوهش با نتایج بوسکارت [۷] را نشان می دهد. سرعت شعله مخلوط پروپان-هوا از نسبت هم‌ارزی ۰/۶ تا حدود ۱/۱ افزایش یافته و پس از آن کاهش می یابد. بیشترین مقدار سرعت شعله به دست آمده در آزمایش‌ها برای مخلوط پروپان-هوا برابر با ۴۲/۱ cm/s و در نسبت هم‌ارزی ۱/۱ به دست آمده است. درصد اختلاف مقادیر آزمایشگاهی با مقادیر کار بوسکارت [۷] در نسبت‌های هم‌ارزی کمتر از ۱ به طور میانگین ۷/۵۱ درصد، در نسبت‌های هم‌ارزی بیشتر از ۱ به طور میانگین ۵/۱۳ درصد و در حالت استوکیومتری ۵/۵۶ درصد است. در این پژوهش، خلوص متان مورد استفاده ۹۸/۸ درصد و پروپان ۹۰ درصد است و از آنجایی که خلوص متان از پروپان بیشتر است، انتظار می رود که نتایج متان در مقایسه با پروپان به نتایج کار بوسکارت [۷] نزدیک تر باشد.

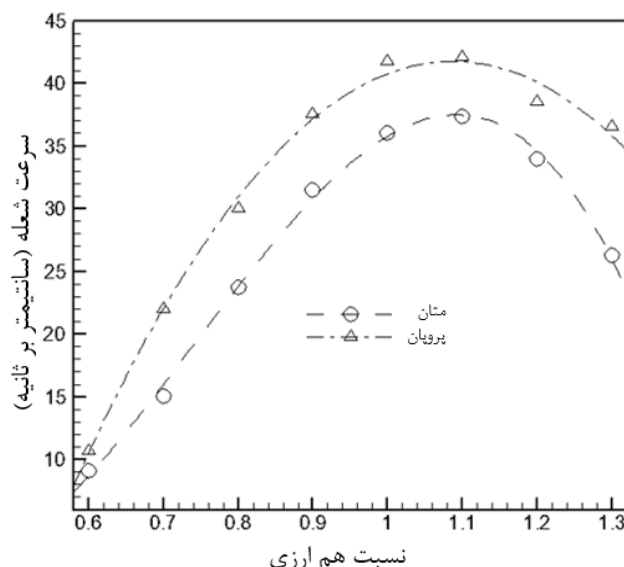


شکل ۴- تغییرات سرعت شعله آرام پیش آمیخته بی دررو متان-هوا به ازای نسبت‌های هم‌ارزی مختلف در فشار اتمسفر و دمای ورودی ۳۰۰K



شکل ۵- تغییرات سرعت شعله آرام پیش آمیخته بی دررو پروپان-هوا به ازای نسبت‌های هم‌ارزی مختلف در فشار اتمسفر و دمای ورودی ۳۰۰K

در شکل ۶، نتایج آزمایشگاهی سرعت شعله پیش آمیخته آرام بی دررو متان-هوا و پروپان-هوا با یکدیگر مقایسه شده‌اند و همان‌طور که ملاحظه می‌شود، سرعت شعله آرام پیش آمیخته بی دررو متان-هوا در مقایسه با پروپان-هوا در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف کمتر است و دلیل آن کم‌تر بودن حداقل انرژی اشتعال پروپان نسبت به متان است. کمترین مقدار اختلاف سرعت متان و پروپان در نسبت هم‌ارزی ۰/۶ و برابر با ۱/۵۶ cm/s و بیشترین اختلاف در نسبت هم‌ارزی ۱/۳ و برابر با ۱۰/۱۸ cm/s است.



شکل ۶- مقایسه نتایج آزمایشگاهی سرعت شعله آرام پیش آمیخته بی دررو متان-هوا و پروپان-هوا به‌ازای نسبت‌های هم‌ارزی مختلف در فشار اتمسفر و دمای ورودی ۳۰۰K

### بحث بر روی خطاها

خطاهای موجود در این پژوهش می‌تواند در مقادیر فشار، سطح ساخته‌شده بالای مشعل، دمای گازهای نسوخته و مهم‌تر از همه دبی تنظیم‌شده توسط روتامترها بروز پیدا کند. با استفاده از روابط زیر می‌توان به یک مقدار کلی جهت خطاهای به‌وجود آمده در مقادیر آزمایشگاهی رسید [۱۶]:

$$\Delta \dot{m}_{fuel} = 0.5\% \text{ reading} + 2.5\% \text{ full scale} \quad (5)$$

$$\Delta \dot{m}_{air} = 0.5\% \text{ reading} + 2.57\% \text{ full scale} \quad (6)$$

در روابط بالا، برای محاسبه میزان خطا در دبی سوخت و هوا، ۰/۵ درصد [۱۶] از مقدار خوانده‌شده توسط اپراتور با میزان خطای موجود در روتامتر پس از کالیبره‌شدن، جمع شده است. پس از محاسبه تغییرات در مقدار دبی جرمی سوخت و هوا، میزان تغییرات در نسبت هم‌ارزی و سرعت، از طریق روابط زیر، قابل محاسبه خواهد بود [۱۶]:

$$\frac{\Delta \phi}{\phi} = \sum_{i=1}^{N_{rotameter}} \left| \frac{\Delta \dot{m}_i}{\dot{m}_i} \right| \quad (7)$$

$$\frac{\Delta S_L}{S_L} = \left| \frac{\Delta T_u}{T_u} \right| + \left| \frac{\Delta P_u}{P_u} \right| + \frac{\Delta A}{A} + \sum_{i=1}^{N_{rotameter}} \left| \frac{\Delta \dot{m}_i}{\dot{m}_i} \right| \quad (8)$$

در روابط بالا، تعداد روتامترها ۲ عدد بوده و در هر حالت مقدار  $\Delta T_u = 1K$ ،  $\Delta P_u = 100 \text{ pa}$  و با در نظر گرفتن مقدار  $1 \text{ mm}$  خطا در اندازه قطر سطح مشعل ساخته‌شده،  $\Delta A = 0.785 \text{ mm}^2$  که همان مساحت اضافه شده به سطح مشعل به دلیل عدم دقت در هنگام ساخت است. نتایج تصحیح‌شده سرعت شعله آرام بی دررو برای نسبت‌های هم‌ارزی مختلف در جداول ۱ و ۲ آورده شده‌اند.

جدول ۱- سرعت شعله آرام پیش آمیخته بی دررو متان-هوا در فشار اتمسفر و دمای ورودی ۳۰۰K

$\phi$	$S_L(\text{cm/s})$
۰/۶±۰/۰۲	۹/۱۴۵±۱/۱
۰/۷±۰/۰۳	۱۵/۰۶±۱/۳
۰/۸±۰/۰۵	۲۳/۷۵±۱/۶
۰/۹±۰/۰۶	۳۱/۵۱±۲/۴۱
۱±۰/۰۸	۳۶/۰۳±۳/۰۷
۱/۱±۰/۰۴	۳۷/۳۳±۱/۵۵
۱/۲±۰/۰۸	۳۳/۹۸±۲/۴۴
۱/۳±۰/۰۹	۲۶/۳۲±۱/۸

جدول ۲- سرعت شعله آرام پیش آمیخته بی دررو پروپان-هوا در فشار اتمسفر و دمای ورودی ۳۰۰K

$\phi$	$S_L(\text{cm/s})$
۰/۶±۰/۰۳	۱۰/۷±۰/۵۹
۰/۷±۰/۰۵	۲۲±۱/۶۹
۰/۸±۰/۰۷	۳۰±۲/۷۸
۰/۹±۰/۰۶	۳۷/۵±۲/۷
۱±۰/۰۵	۴۱/۷±۲/۳
۱/۱±۰/۰۹	۴۲/۱±۳/۶۷
۱/۲±۰/۰۴	۳۸/۵±۱/۴۸
۱/۳±۰/۰۵	۳۶/۵±۱/۶

## نتیجه گیری

در این پژوهش، با روش شار حرارتی، سرعت شعله پیش آمیخته آرام بی دررو متان-هوا و پروپان-هوا در فشار اتمسفر، دمای ورودی ۳۰۰ K و نسبت هم‌ارزی ۰/۶ تا ۱/۳ اندازه گیری شده است. سرعت شعله مخلوط متان-هوا و پروپان-هوا از نسبت هم‌ارزی ۰/۶ تا حدود ۱/۱ افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار سرعت شعله به دست آمده در آزمایش‌ها در نسبت هم‌ارزی ۱/۱ بوده و برای مخلوط متان-هوا برابر با ۳۷/۳۳ cm/s و برای مخلوط پروپان-هوا برابر با ۴۲/۱ cm/s به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که سرعت شعله آرام پیش آمیخته بی دررو متان-هوا در مقایسه با پروپان-هوا، در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف، کمتر است. نتایج آزمایشگاهی تطابق قابل قبولی را با شبیه‌سازی عددی صورت گرفته به وسیله کد پیش آمیخته نرم افزار کمکین ۲ و نتایج سایر محققان نشان می‌دهد.

## تشکر و قدردانی

این تحقیق با استفاده از حمایت‌های مالی شرکت گاز استان خراسان رضوی انجام شده که شایسته تقدیر و تشکر می‌باشد.

## منابع

1. D. Bradley, R. A. Hicks, M. Lawes, C. G. W. Sheppard, and R. Woolley, "The Measurement of Laminar Burning Velocities and Markstein Numbers for Iso-octane-Air and Iso-octane-n-Heptane-Air Mixtures at Elevated Temperatures and Pressures in an Explosion Bomb," *Combustion and Flame*, 115, 1998, pp. 126-144.
2. A. Tripathi, H. Chandra and M. Agrawal, "Effect of Mixture Constituents on the Laminar Burning Velocity of LPG-CO<sub>2</sub>-Air," *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1, No. 3, 2010, pp. 16-20.



3. S. Y. Liao, D. M. Jiang, Z. H. Huang, K. Zeng, and Q. Cheng, "Determination of the Laminar Burning Velocities for Mixtures of Ethanol and Air at Elevated Temperatures," *Applied Thermal Engineering*, 27, 2007, pp. 374-380.
4. O. C. Kwon and G. M. Faeth, "Flame/Stretch Interactions of premixed Hydrogen-Fueled Flames: Measurements and Predictions," *Combustion and Flame*, 124, 2001, pp. 590-610.
5. A. van Maaren and L. P. H. de Goey, "Stretch and the Adiabatic Burning Velocity of Methane- and Propane-Air Flames," *Combustion Science and Technology*, 102, 1994, pp. 309-314.
6. L. P. H. de Goey, A. van Maaren and R. M. Quax, "Stabilization of Adiabatic Premixed Laminar Flames on a Flat-Flame Burner," *Combustion Science and Technology*, 92, 1993, pp. 201-207.
7. K. J. Bosschaart, "Analysis of the Heat Flux Method for Measuring Burning Velocities," PhD Thesis, Eindhoven University of Technology, Department of mechanical engineering, 2002.
8. A. A. Konnov, R. Riemeijer and L. P. H. de Goey, "Adiabatic Laminar Burning Velocities of CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub> + air Flames at Low Pressures," *Fuel*, 89, 2010, pp. 1392-1396.
9. A. A. Konnov, "The Effect of Temperature on the Adiabatic Laminar Burning Velocities of CH<sub>4</sub> - Air and H<sub>2</sub> - Air Flames," *Fuel*, 89, 2010, pp. 2211-2216.
10. R. J. Kee, J. F. Grcar, M. D. Smooke and J. A. Miller, "PRMIX: a FORTRAN Program for Modeling Steady Laminar One-Dimensional Premixed Flames," Report Sandia National Laboratories, 1985.SAND 85-8240, 1985.
11. R. J. Kee, F. M. Rupley and J. A. Miller, "CHEMKIN-II: a Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics," Technical Report SAND 89-8009, Sandia National Laboratories, 1989.
12. V. Ratna Kishore, N. Duhan, M. R. Ravi and A. Ray, "Measurement of Adiabatic Burning Velocity in Natural Gas-Like Mixtures," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 2008, pp. 10-16.
13. J. Göttgens, F. Mauss and N. Peter, "Analytic Approximations of Burning Velocities and Flame Thickness of Lean Hydrogen, Methane, Ethylene, Ethane, Acetylene and Propane Flames," *Symposium (international) on Combustion*, 24, 1992, pp. 129-135.
14. [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/version30/text30.html](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/version30/text30.html), Accessed 28 october 2011.
15. <http://www.princeton.edu/~cklaw/kinetics/slw001/index.html>, Accessed 28 october 2011.
16. R. T .E. Hermanns, "Laminar Burning Velocities of Methane-Hydrogen-Air Mixtures," PhD Thesis, Eindhoven University of Technology, Department of mechanical engineering, 2007.

## English Abstract

### «Technical Note»

## Determination of Laminar Burning Velocity for Gaseous Fuels with the Heat Flux Method

N. Tinati<sup>1</sup>, M. N. Bajestani<sup>1</sup>, H. M. Heravi<sup>1</sup>, J. A. Esfahani<sup>2</sup> and K. Bashirnezhad<sup>1</sup>

1- Departement of Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Mashhad.

2- Departement of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

(Received: 2013.1.13, Received in revised form: 2013.5.23, Accepted: 2013.8.25)

In this research experimental measurements of adiabatic burning velocities in methane-air and propane-air flames were carried out over a wide range of equivalence ratios at atmospheric pressure. Heat flux method was used for measurement of burning velocities. Experiments were done for methane-air and propane-air mixtures at various equivalence ratios. The maximum burning velocity for methane-air and propane-air was obtained at equivalence ratio of 1.1 as 37.33 and 42.1 cm/s respectively. The results were in satisfactory agreement with published data in the literature. Simulations were performed using Premix code of ChemkinII with GRI Mech3.0 and Princeton university reaction mechanisms for the combustion of methane and propane respectively. The simulation and experimental results also showed good agreement

**Keywords:** Burning velocity, Laminar flame, Premix, Heat flux method, Numerical simulation