

## اثر افزودن هیدروژن بر پاسخ دینامیکی شعله جریان متقابل پیش آمیخته جزئی

محمدعلی اختر دانش<sup>۱</sup>، محمدجواد حسین خانی<sup>۲</sup>، محمد فرشچی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، mohammadali.akhtardanesh@ae.sharif.edu

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، mj.hosseiniikhah@ae.sharif.edu

۳- استاد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، farshchi@sharif.edu

\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۹، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۳/۰۳/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹)

**چکیده:** هیدروژن نقش کلیدی در کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی در انواع سامانه‌های تولید انرژی دارد. هرچند استفاده از سوخت هیدروژنی، وابستگی به سوخت‌های کربن‌دار را کاهش می‌دهد، اما با چالش‌های جدی همراه است. تغییر سوخت سامانه‌های تولید انرژی، از هیدروکربن‌های فسیلی کربن‌دار به هیدروژن، بدون شناخت تأثیرات دینامیکی این سوخت امکان‌پذیر نیست. در این پژوهش، به روش تجربی اثرات افزودن هیدروژن بر پاسخ دینامیک یک شعله جریان متقابل پیش‌آمیخته جزئی متان-هوا بررسی شده است. همچنین به کمک شبیه‌سازی عددی یک‌بعدی ساختار شعله پایا و بدون تحریک آکوستیکی شعله جریان متقابل متان-هوا تحت اثر افزودن هیدروژن آنالیز شده است. به کمک این روش، نقش افزودن هیدروژن بر نرخ آزادسازی حرارت شعله و تغییرات ضخامت ناحیه حرارتی شعله بحث شده است. یک آزمونگر شعله جریان متقابل با قابلیت تحریک آکوستیکی برای مطالعه تجربی اثرات افزایش هیدروژن بر شعله متان-هوا استفاده و روش نورتابی رادیکال  $CH^*$  برای استخراج پاسخ دینامیک شعله به کار گرفته شد. نتایج نشان داد، با افزایش هیدروژن به شعله، شدت تابش رادیکال  $CH^*$  در حالت بدون تحریک آکوستیک، کاهش می‌یابد؛ اما در مواجهه با امواج آکوستیک، دامنه نوسانات نرخ آزادسازی حرارت و شدت تابش رادیکال  $CH^*$  افزایش خواهد داشت. این امر سبب افزایش مقدار تابع پاسخ شعله با افزودن هیدروژن خواهد بود.

**کلیدواژگان:** تابع پاسخ شعله، هیدروژن، پیش آمیخته جزئی، آکوستیک، ناپایداری احتراق.

### مقدمه

احتراق پاک نقش مهمی در کاهش آلاینده‌های اکسید نیتروژن، NOx و حفظ محیط‌زیست دارد. احتراق پیش‌آمیخته رقیق از سوخت، به‌عنوان یک راهکار برای کاهش آلاینده‌های شعله‌ها در صنعت تلقی می‌شود. هرچند که به دنبال آن مسئله ناپایداری احتراق، به‌خصوص ناپایداری ترموآکوستیکی در این رژیم اختلاط مطرح می‌شود. ناپایداری ترموآکوستیکی به دلیل برهمکنش شعله و امواج آکوستیکی در محفظه احتراق رخ می‌دهد و می‌تواند آثار مخربی در پی داشته باشد. یکی از راه‌های حل مشکل ناپایداری احتراق و آلاینده‌های واکنش‌های شیمیایی ناشی از سوختن هیدروکربن‌ها، استفاده از رژیم احتراق پیش‌آمیخته جزئی<sup>۱</sup> است. مخلوط سوخت متان و هیدروژن که امروزه "هیتان" نامگذاری شده است توجه صنعت و پژوهشگران را به خود معطوف ساخته است. این مخلوط سوخت می‌تواند انتخاب مناسبی برای جایگزینی سوخت‌های هیدروکربنی فسیلی باشد و همزمان کاهش آلاینده‌های کربنی و کنترل پایداری شعله را بهبود بخشد و از دیدگاه ارزش اقتصادی، مقرون به‌صرفه باشد. مسئله ناپایداری احتراق در سال‌های اخیر رشد و توسعه موتورهای توربینی را با چالش‌های جدی مواجه کرده است. با وجود چندین دهه پژوهش، هنوز ابزاری جامع برای پیش‌بینی ناپایداری احتراق ترموآکوستیک و استفاده از آن در فازهای اولیه طراحی

<sup>1</sup> Partially Premixed

سیستم، وجود ندارد. به عبارت دیگر، طراحی محفظه‌های احتراق اغلب بر اساس آزمایش‌های تجربی و تجربیات پیشین طراح، صورت می‌گیرد. در نتیجه، شناخت پاسخ دینامیکی شعله به امواج آکوستیکی یک نیاز اساسی برای تجزیه و تحلیل ناپایداری ترموآکوستیکی در محفظه احتراق خواهد بود.

رژیم اختلاط پیش‌آمیخته جزئی، شامل یک جریان واکنش‌دهنده پیش‌آمیخته غنی از سوخت<sup>۱</sup> برای احتراق کامل و یک جریان اکسند (یا جریان واکنش‌دهنده) برای رقیق‌سازی و کاهش دمای شعله است. واکنش اولیه سوخت و هوا در مخلوط پیش‌آمیخته آغاز می‌شود و مخلوط نسوخته یا گونه‌های میانی باقیمانده ناشی از آن، با جریان اکسند به‌طور کامل واکنش خواهد داد. شعله‌های پیش‌آمیخته جزئی کاربردهای گسترده‌ای دارند. به‌طور مثال در احتراق قطره، ابتدا یک ناحیه پیش‌گرم غنی از سوخت اطراف قطره تبخیر شده شکل می‌گیرد و سپس در مجاورت با هوای اطراف قطره، به‌صورت غیرپیش‌آمیخته واکنش شیمیایی کامل می‌شود [۲،۱].

افزودن هیدروژن به متان، مشخصه‌های خاموشی<sup>۲</sup> شعله و گستره اشتعال نسبت هم‌ارزی آن را بهبود می‌بخشد [۳]. سرعت شعله مخلوط هیتان، با افزایش غلظت هیدروژن افزایش می‌یابد؛ اما دمای شعله، در نزدیکی نقطه خاموشی، به میزان هیدروژن مخلوط وابسته نیست و فقط تابع نسبت هم‌ارزی است [۴]. مشخصه‌های خاموشی شعله تحت اثر تحریک آکوستیک به عدد بی‌بعد لوویس،  $Le$ ، (نسبت نفوذ حرارت به نفوذ جرم) وابسته است. در واکنش‌دهنده‌هایی که  $Le > 1$  دارند، نرخ کرنش<sup>۳</sup> خاموشی تحت اثر امواج آکوستیکی بیش از نرخ کرنش خاموشی شعله پایا است. اما در واکنش‌دهنده‌هایی که  $Le \leq 1$  دارند، تقریباً نرخ کرنش خاموشی شعله تحریک شده برابر شعله پایا است [۵]. پاسخ دینامیکی شعله به تحریک آکوستیکی جریان ورودی به کمک یک تابع تبدیل<sup>۴</sup> معرفی می‌شود. تابع دینامیکی پاسخ شعله (۱) عبارت است از نسبت نوسانات نرخ آزادسازی حرارت<sup>۵</sup> به نوسانات آکوستیکی فشار یا سرعت ورودی [۶]. در حالت کلی این تابع به  $f$  فرکانس امواج آکوستیکی و  $|p'/\bar{p}|$  دامنه آن‌ها وابسته است.

$$FTF(f, |p'/\bar{p}|) = \frac{Q'/\bar{Q}}{p'/\bar{p}} \quad (1)$$

در معادله (۱)  $Q'$  نوسانات نرخ آزادسازی حرارت شعله،  $\bar{Q}$  نرخ تولید حرارت میانگین شعله،  $p'$  فشار موج آکوستیک و  $\bar{p}$  فشار میانگین میدان جریان احتراق است. مقایسه دینامیکی سه شعله پیش‌آمیخته رقیق از سوخت هیدروژن، متان و پروپان نشان داده است که در پاسخ به یک ورودی سرعت پله با دامنه ۱ متر در ثانیه، این سه شعله به ترتیب، با کمترین زمان پاسخ و کمترین فراجش<sup>۶</sup>، خروجی نرخ تولید حرارت را تغییر داده‌اند. این نتیجه نقش عدد بی‌بعد لوویس را در پاسخ دینامیکی شعله‌های پیش‌آمیخته بیش از پیش روشن کرد. هرچه عدد لوویس مخلوط واکنش‌دهنده کمتر باشد، سریع‌تر نسبت به ورودی اغتشاشی آکوستیک، پاسخ خواهد داد و به عبارت بهتر، پاسخ شعله تقویت خواهد شد [۷]. در رژیم غیرپیش‌آمیخته نیز مطالعه شعله جریان متقابل هیدروژن-اکسیژن نشان داده است، به علت اینکه مقیاس زمانی امواج آکوستیک در مرتبه میلی‌ثانیه و مقیاس زمانی واکنش شیمیایی در مرتبه میکروثانیه است، واکنش‌های شیمیایی را می‌توان شبه‌تعادلی فرض کرد. در چنین شرایطی با اعمال امواج فشاری آکوستیکی، متناسب با دامنه امواج، دامنه نوسانات دمای شعله افزایش خواهد داشت [۸].

<sup>1</sup> Fuel Rich

<sup>2</sup> Extinction

<sup>3</sup> Strain Rate

<sup>4</sup> Flame Transfer Function

<sup>5</sup> Heat Release

<sup>6</sup> Overshoot

محاسبه اثرات افزودن هیدروژن به شعله حاصل از شیار<sup>۱</sup> متان توسط حلگر CANTERA و مکانیزم واکنش GRI 3.0 نشان داده است که با افزایش درصد هیدروژن در سوخت از مقدار صفر تا ۵۰٪، سرعت شعله از مقدار ۲۶/۱ به مقدار ۴۱/۱ سانتیمتر در ثانیه و طول شعله از مقدار ۳/۸۳ به ۲/۴۳ میلی‌متر تغییر می‌کند. زمان تأخیر کلی شعله را می‌توان از طول شعله به مؤلفه محوری شعله،  $\tau \approx h_f/U_{ax}$  محاسبه کرد. در نتیجه، زمان تأخیر شعله نیز از مقدار ۷/۹ به ۵/۳ میلی‌ثانیه کاهش می‌یابد. در نتیجه با افزودن هیدروژن تأخیر پاسخ شعله کاهش چشمگیری دارد [۹]. سرعت شعله هیدروژن،  $S_L$  تابع نسبت هم‌ارزی،  $\phi$ ، است و از معادله تجربی (۲) قابل محاسبه است [۱۰]. در میان پژوهش‌های انجام شده، شعله‌های پیش‌آمیخته و غیرپیش‌آمیخته تاحدی بررسی شده‌اند. اما اثرات هیدروژن بر پاسخ دینامیکی شعله پیش‌آمیخته جزئی پتانسیل بالایی برای مطالعه تحقیق در این حوزه دارد.

$$S_L \left( \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) = -4.7 - 245.3\phi + 926.8\phi^2 - 440.3\phi^3 \quad (2)$$

روش نورتایی شیمیایی<sup>۲</sup> رادیکال‌های  $\text{CH}^*$  و  $\text{OH}^*$  روش غیرتداخلی مرسوم هستند که از دهه ۷۰ تاکنون برای مطالعات دینامیک شعله، به‌خصوص تعیین جبهه شعله، نسبت هم‌ارزی و نرخ آزادسازی حرارت آن استفاده شده است [۱۱]. در شعله‌های پیش‌آمیخته یا غیرپیش‌آمیخته، این دو رادیکال در فاصله چند میکرومتری بیشینه حرارت شعله، بیشینه تابش شدت نور را از خود نشان می‌دهند و می‌توانند به‌عنوان معیار مناسبی از نرخ آزادسازی حرارت شعله در نظر گرفته شوند [۱۲]. تابش رادیکال  $\text{CH}^*$  در محدوده طول موج‌های مرئی (۴۳۰ نانومتر) و تابش رادیکال  $\text{OH}^*$  در محدوده فرابنفش (۳۰۹ نانومتر) است [۱۳]. فیلترهای اپتیکی میان‌گذر، توانایی جداسازی این طول موج را از طیف تابش کلی شعله دارند.

در این پژوهش، اثرات افزودن هیدروژن بر روی پاسخ دینامیکی یک شعله پیش‌آمیخته جزئی متان-هوا به کمک یک آزمونگر شعله جریان متقابل بررسی شده است. در بخش آزمونگر تجربی، به جزئیات مشعل، نحوه تحریک آکوستیکی شعله و روش اندازه‌گیری پارامترهای موردنیاز اشاره شده است. نقاط آزمون به‌گونه‌ای انتخاب شده است که تا حد ممکن نسبت هم‌ارزی نازل جریان پیش‌آمیخته و دمای کلی شعله تغییر زیادی نداشته باشد. سپس یک حلگر عددی یک‌بعدی برای بررسی ساختار پایای شعله‌ها به کارگرفته شده است. نورتایی شیمیایی رادیکال  $\text{CH}^*$  شعله پایا و ارتباط آن با غلظت مولی گونه بحث شده است. در بخش بعدی نتایج تحریک آکوستیکی شعله‌های آزمون و تحلیل و آنالیز آورده شده است و در پایان جمع‌بندی نتایج ارائه شده است.

## آزمونگر تجربی

به‌منظور آزمون تجربی روی شعله جریان متقابل، آزمونگر تحریک آکوستیکی شعله که پیش‌تر در پژوهش‌های [۱۴-۱۸] به تفصیل به آن پرداخته شده، به کار گرفته شده است. تفاوت مدار آزمون این پژوهش با سایر کارهای قبلی، افزودن خط تزریق هیدروژن به خط تزریق سوخت متان است. شکل ۱ طرح‌واره مدار آزمون تجربی تحریک آکوستیک شعله جریان متقابل و تجهیزات آن را نمایش می‌دهد. به‌منظور تولید شعله در رژیم پیش‌آمیخته جزئی از نازل فوقانی هوا و از نازل تحتانی مخلوط پیش‌آمیخته غنی از سوخت در محفظه آزمونگر تزریق می‌شود. انتهای هر محفظه با یک مولد امواج آکوستیک، به قطر ۳۰ سانتیمتر که در محدوده فرکانسی ۱۲۰۰-۲۵ هرتز توانایی تولید امواج دارد، بسته شده است. امواج آکوستیکی به‌وسیله یک مولد سیگنال سینوسی و یک آمپلی‌فایر به مولدهای آکوستیک ارسال می‌شود. دامنه امواج آکوستیکی، با یک صوت‌سنج B&K 2250 (با دقت  $\pm 1.5$  دسیبل) اندازه‌گیری شده است. برای برقراری ارتباط بین شدت صوت و دامنه فشار آکوستیکی امواج از معادله (۱) استفاده شده است [۱۹] که در آن  $P_{ref} = 20 \mu Pa$ .

<sup>1</sup> Slit

<sup>2</sup> CH\* Chemiluminescence

$$dB = 20 \log \left( \frac{P'}{P_{ref}} \right) \quad (3)$$

محدوده فرکانس نوسانات آکوستیک، فرکانس ۲۰-۳۵۰ هرتز انتخاب شده است. فرکانس‌های کمتر از ۲۰ هرتز به دلیل عدم توانایی مولد آکوستیکی و فرکانس‌های بالاتر از ۳۵۰ هرتز به دلیل عدم تأثیرگذاری امواج آکوستیکی بر روی کمیت‌های قابل اندازه‌گیری شعله صرف‌نظر شده است. دو پارامتر نرخ کرنش جریان و نسبت هم‌ارزی، نقش مهمی در تشکیل شعله جریان متقابل، محل قرارگیری، سطح و ضخامت شعله ایفا می‌کنند. نرخ کرنش شعله جریان متقابل مطابق معادله (۴) است که در آن  $L$  فاصله دو نازل،  $V_{top}$  سرعت جریان نازل بالا،  $V_{bottom}$  سرعت جریان نازل پایین،  $\rho_{bottom}$  و  $\rho_{top}$  چگالی متناظر با هریک است.

$$SR = \frac{2V_{top}}{L} \left( 1 + \frac{V_{bottom}}{V_{top}} \sqrt{\frac{\rho_{bottom}}{\rho_{top}}} \right) \quad (4)$$

جدول ۱ دبی سوخت و هوای سه شعله مذکور را نمایش می‌دهد. به منظور حفاظت شعله از اغتشاشات محیطی و هدایت فرآورده‌های واکنش سوخت و هوا در هر سه شعله، از جریان کنارگذر نیتروژن با خلوص ۹۹/۹۹٪ و دبی ثابت ۲۰ لیتر بر دقیقه استفاده شده است. سه شعله برای آزمون انتخاب شده است، به طوری که درصد مولی هیدروژن در مخلوط پیش‌آمیخته نازل پایین ۰، ۱۱ و ۱۹ درصد باشد. به کمک معادله (۵) مقدار استوکیومتریک شعله هیتان قابل محاسبه است. کمترین نسبت هم‌ارزی قابل اشتعال شعله متان ۰/۴۵ و برای شعله هیدروژن ۰/۱۴ گزارش شده است [۲۰].

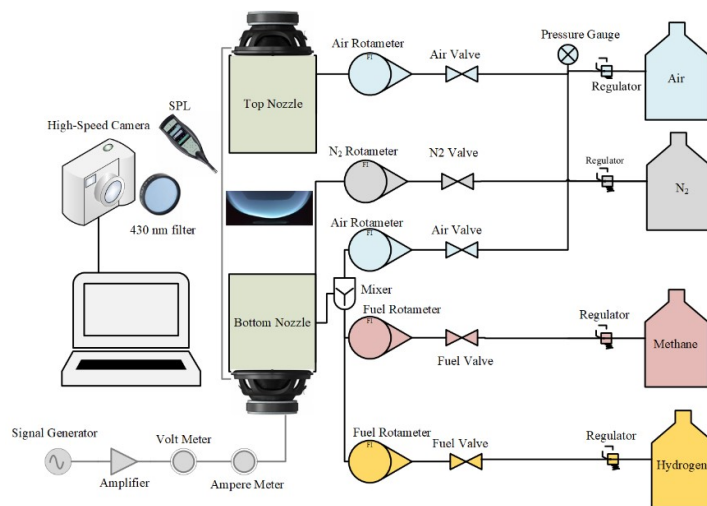
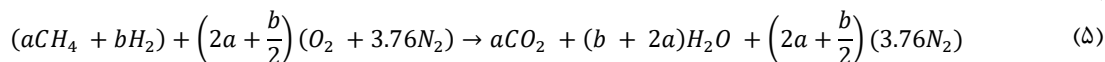


Figure 1- Schematic of the experimental setup of the acoustic exciter of the counterflow flame

شکل ۱- طرح‌واره مدار آزمون تحریک آکوستیک شعله جریان متقابل

جدول ۱- شرایط آزمون سه شعله جریان متقابل پیش‌آمیخته جزئی متان-هیدروژن-هوا

Table 1- The conditions of three partially premixed counterflow flame of CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Air

No	Top nozzle			Bottom nozzle				Global		
	$\dot{Q}_{air,top}$ (L/min)	$\dot{Q}_{f,top}$ (L/min)	$\varphi_{top}$	$\dot{Q}_{air,b}$ (L/min)	$\dot{Q}_{CH_4,b}$ (L/min)	$\dot{Q}_{H_2,b}$ (L/min)	$\varphi_b$	% H <sub>2</sub>	SR (1/s)	$M_{ratio}$
I	15	0	0	15	2.3	0	1.7	0	119	1.76
II	15	0	0	15	2.0	0.3	1.7	11	110	1.36
III	15	0	0	15	1.7	0.7	1.4	19	106	1.14

اندازه‌گیری نرخ آزادسازی حرارت در آزمون‌های تجربی به روش مستقیم دشوار است. لذا از روش غیرتداخلی نورتابی شیمیایی رادیکال  $CH^*$  برای این منظور استفاده می‌شود. در این پژوهش نیز به همین روش، نرخ آزادسازی حرارت شعله استخراج شده است. به کمک فیلتر اپتیکی میان‌گذر ( $10 \pm 430$  نانومتر)، از روی تصاویر لحظه‌ای سرعت بالای شعله، شدت تابش رادیکال  $CH^*$  محاسبه شده است. بر مبنای معادله (۶)، از نسبت تابش  $CH^*$  لحظه‌ای به  $CH^*$  میانگین شعله می‌توان نسبت نرخ آزادسازی حرارت لحظه‌ای شعله به نرخ آزادسازی حرارت متوسط را استخراج کرد [۲۱].

$$\frac{Q'}{\bar{Q}} \approx \frac{|CH^*|'}{|CH^*|} \quad (6)$$

برای تصویربرداری از یک دوربین سرعت‌بالا CMOS با قدرت تفکیک ۱۲۸۰ در ۷۲۰ پیکسل و نرخ تصویربرداری ۱۹۲۰ فریم در ثانیه استفاده شده است. بزرگنمایی تصاویر به‌گونه‌ای است که قطر نازل با ۲۴۰ پیکسل مشخص می‌شود. در نتیجه مقیاس بزرگنمایی تصاویر ۰/۱۰۵ میلی‌متر در پیکسل است. تصویربرداری برای هر فرکانس و دامنه تحریک، حداقل در ۱۰۰ سیکل تناوبی تحریک انجام شده است. به‌منظور بررسی پدیده‌های فیزیکی حاکم، نیاز است کمیت‌های لحظه‌ای شعله، تعریف دقیق ریاضی داشته باشد. طبق شکل ۲، ضخامت لحظه‌ای شعله،  $l'$ ، حداقل بالاترین تا پایین‌ترین پیکسل تصویر فیلتر شده در خط تقارن محوری شعله، در نظر گرفته شده است. سطح لحظه‌ای شعله،  $A'$ ، از شمارش تعداد پیکسل روشن و ضرب آن در مقیاس طولی و عرضی پیکسل‌ها مشخص می‌شود.

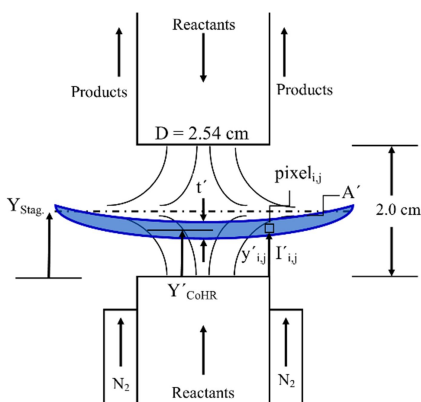


Figure 2- The geometric definition of the instantaneous thickness, area, center of position and intensity of the counterflow flame

شکل ۲- تعریف هندسی ضخامت، سطح، مرکز نرخ آزادسازی حرارت و شدت تابش لحظه‌ای شعله جریان متقابل

شدت تابش لحظه‌ای رادیکال  $CH^*$ ،  $I'$ ، از انتگرال‌گیری شدت روشنایی تمامی پیکسل‌های فیلتر شده، محاسبه می‌شود. برای اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی شعله، از آنجا که لبه‌های شعله دائم در حال تغییر شکل است، مرکز سطح تابش لحظه‌ای، روی محور تقارن شعله با معادله (۷) معرفی می‌شود که در آن  $y'_i$  فاصله لحظه‌ای پیکسل از مرکز نازل پایین و  $I'_i$  شدت تابش لحظه‌ای پیکسل در طول موج ۴۳۰ نانومتر است. تمام فرایندها ذکر شده در بستر یک کد پردازش تصویر در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی و اجرا شده است. در این روش، عدم قطعیت محاسبه کمیت‌های میانگین همچون محل مرکز سطح میانگین یا نرخ آزادسازی حرارت میانگین کمتر از ۰/۵٪ و عدم قطعیت محاسبه کمیت‌های نوسانی همچون، سطح لحظه‌ای، شدت تابش رادیکال  $CH^*$  لحظه‌ای و مرکز سطح تابش لحظه‌ای شعله کمتر از ۲٪ است. تکرارپذیری آزمون‌ها نیز در مرجع [۱۵] قابل مطالعه است.

$$Y'_{CoHR} = \frac{\sum y'_i I'_i}{\sum I'_i} \quad (7)$$

## حل عددی

جهت بررسی ساختار جریان پایه میدان احتراقی شعله و مقایسه مکانی ناحیه تولید  $CH^*$  و ناحیه تولید حرارت سه شعله، از یک شبیه‌سازی یک بعدی میدان احتراقی استفاده شده است. با به‌کارگیری حلگر OPPDIF [۲۲] و خواص ترمودینامیکی و انتقالی بسته نرم‌افزاری CHEMKIN [۲۳] سه شعله مذکور به‌صورت تک‌بعدی، پایا و با فرضیات جریان غیرلزج و غیرچرخشی شبیه‌سازی شده است. برای اعتبارسنجی حل عددی، به کمک مکانیزم واکنشی GRI3.0 [۲۴] یک شعله پیش‌آمیخته جزئی متان-هوا حل شده است و نتایج آن با نتایج تجربی مقایسه شده است. در این حل عددی برای اعمال شرایط مرزی، از نازل پیش‌آمیخته، مخلوط غنی از سوخت متان-هوا با نسبت هم‌ارزی  $\phi = 1.6$  و از نازل دیگر، هوا وارد میدان جریان شده، به‌گونه‌ای که نرخ کرنش کلی جریان  $20 \text{ 1/s}$  باشد. دمای هر دو جریان واکنش‌دهنده  $300$  کلوین فرض شده است و فاصله محوری دو نازل از یکدیگر برابر  $2/0$  سانتی متر قرار داده شده است.

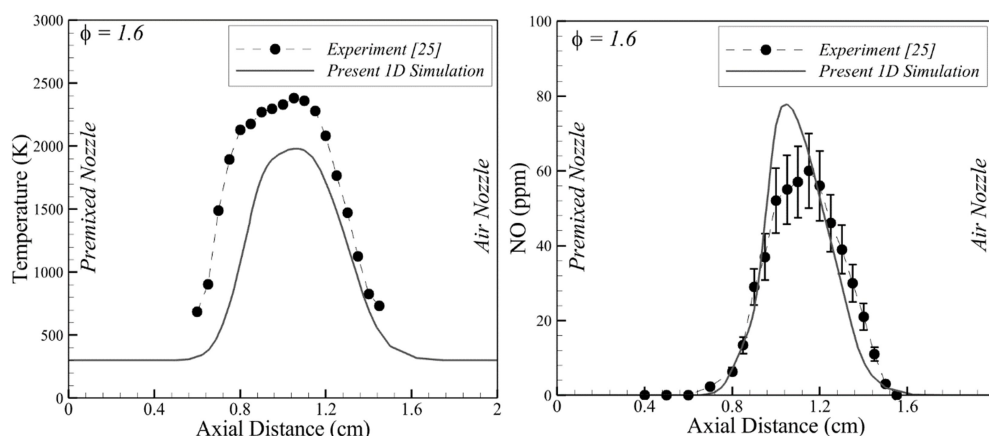


Figure 3- Comparison of the measured [25] and simulated temperature and NO mixture fraction of the partially premixed methane-air ( $SR = 20 \text{ 1/s}$  and  $\phi = 1.6$ )

شکل ۳- مقایسه دما و کسر مولی NO تجربی [۲۵] با شبیه‌سازی شعله پیش‌آمیخته جزئی متان-هوا با  $\phi = 1.6$  و  $SR = 20 \frac{1}{s}$

غلظت NO و دمای شعله به روش فلورسانس القایی با لیزر<sup>۱</sup>، LIF، در مرجع [۲۵] گزارش شده است. نتایج اعتبارسنجی حل در شکل ۳ مشاهده می‌شود. مطابقت مناسبی در ضخامت ناحیه تغییر دما و غلظت NO، به خصوص در بخش پیش‌گرمایش ناحیه غیرپیش‌آمیخته مشاهده می‌شود. اختلاف دمای  $300$  کلوین بین بیشینه دمای آزمون تجربی و شبیه‌سازی به علت محدودیت روش LIF در ناحیه دما بالا بازمی‌گردد [۲۵]. با توجه به اینکه هدف از شبیه‌سازی یافتن موقعیت لایه حرارت و مناطق تشکیل گونه‌های میانی است و مقادیر مطلق آن در این پژوهش مدنظر نبوده است، این شبیه‌سازی برای آنالیز پژوهش کارآمد تلقی می‌شود.

## نتایج و بحث

به‌منظور بررسی اثرات افزودن هیدروژن بر ساختار شعله پایای جریان متقابل، سه شعله ذکر شده در جدول ۱ به کمک روش عددی و با به‌کارگیری مکانیزم واکنشی GRI3.0 بررسی شده است. در کنار حل عددی، نورتابی شیمیایی رادیکال  $CH^*$  شعله پایا با زمان نوردهی  $500$  میلی‌ثانیه انجام شده است. از آن جا که شدت نور مزاحم در تصاویر سه‌بعدی ممکن به درک صحیح

<sup>1</sup> Laser-induced fluorescence

از توزیع  $CH^*$  شعله منجر نشود؛ تصویر سه بعدی شعله به کمک تبدیل آبل<sup>۱</sup> به توزیع تقارن محوری رادیکال  $CH^*$  تبدیل شده است [۲۶].

### ساختار شعله جریان پایا

شکل ۴ اثر افزودن هیدروژن بر شعله جریان متقابل متان-هوا در رژیم جریان پیش آمیخته جزئی را به دو صورت تصاویر عادی و تبدیل آبل نمایش می دهد. در تصاویر عادی شعله مشخص است که با افزودن هیدروژن به مخلوط متان-هوا شدت نور کلی  $CH^*$  کاهش دارد؛ اما تبدیل آبل تصاویر نشان می دهد که افزودن هیدروژن سبب کاهش ضخامت لایه تشکیل رادیکال  $CH^*$  شده است. سه شعله آزمون با هیدروژن به میزان ۰، ۱۱ و ۱۹٪ ضخامت لایه  $CH^*$  به ترتیب ۱/۱۶، ۰/۹۵ و ۰/۵۶ سانتیمتر دارد. سطح شعله نیز به ترتیب به مقدار ۶/۶، ۵/۳ و ۳/۲ سانتیمتر مربع اندازه گیری شد. علاوه بر تغییرات هندسی فوق، شکل ۴ نشان می دهد که پس از اعمال تبدیل آبل، مقدار بیشینه شدت تابش  $CH^*$  با افزایش هیدروژن، کاهش می یابد. توجه شود که به طور کلی کاهش  $CH^*$  به معنی نرخ آزادسازی حرارت نیست؛ زیرا در این مورد، هرچند شدت تابش  $CH^*$  با افزایش هیدروژن کاهش می یابد، اما شدت تابش  $OH^*$  افزایش خواهد داشت. (برای استخراج تابع پاسخ شعله شدت تابش لحظه ای  $CH^*$  با شدت تابش میانگین  $CH^*$  همان شعله بی بعد می شود. پیش تر نیز ذکر شد که این کمیت با نرخ آزادسازی حرارت بی بعد متناسب است.

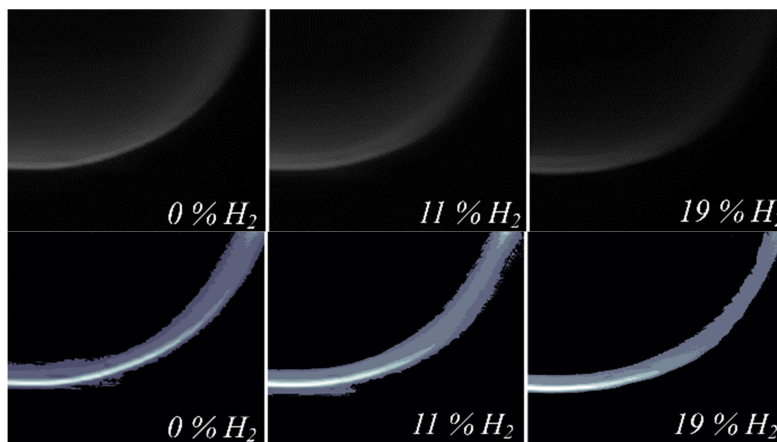


Figure 4- Effects of the hydrogen addition on the  $CH^*$  emission of the methane-air counterflow flame, before (top) and after (bottom) Abel inversion

شکل ۴- اثر افزودن هیدروژن بر تابش رادیکال  $CH^*$  شعله جریان متقابل پیش آمیخته جزئی متان-هوا، قبل (بالا) و بعد از اعمال تبدیل آبل (پایین)

انتخاب نقاط آزمون سه شعله به گونه ای انجام شد که تغییرات درصد هیدروژن و متان، کمترین تأثیر بر خواص ترمودینامیک و انتقالی مخلوط را داشته باشد. در جدول ۲ خلاصه نتایج آورده شده است. با افزایش درصد هیدروژن، جرم مولکولی فرآورده ها از مقدار ۲۵/۱ گرم بر مول به مقدار ۲۴/۸ رسیده است. علت این امر تولید گونه ای سبک تر همانند  $H_2$  در اثر افزودن هیدروژن و کاهش درصد مولی گونه های سنگین تر همچون  $CO_2$  است. به طور کلی، با افزایش هیدروژن به مخلوط سوخت، درصد مولی  $CH^*$  و  $CO_2$  کاهش یافته و درصد مولی  $OH$ ،  $H_2$  و  $H_2O$  افزایش می یابد. همچنین در جدول ۲ مشاهده می شود، خواص انتقالی مانند ظرفیت گرمایی ویژه، با افزایش هیدروژن به مخلوط سوخت، کاهش بسیار اندکی دارد. چگالی

<sup>1</sup> Abel Inversion

مخلوط فرآورده نیز تغییرات اندکی نشان داده است. دمای فرآورده از مقدار ۱۹۸۷ به مقدار ۲۰۱۰ کلوین می‌رسد که این تغییرات اندک نیز به دلیل تغییرات نسبت هم‌ارزی است. جدول ۲ اثر افزودن هیدروژن بر گونه‌های میانی  $CH^*$  و  $OH^*$  را نیز مشخص می‌کند. پیش‌تر ذکر شد که این دو گونه میانی می‌تواند به‌عنوان معیاری از محل تشکیل شعله و نرخ آزادسازی حرارت شعله استفاده شود. مشاهده می‌شود در اثر افزودن هیدروژن به سوخت، غلظت مولی  $CH^*$  کاهش و غلظت مولی  $OH^*$  افزایش می‌یابد. برای روشن شدن ارتباط بین غلظت مولی  $CH^*$  (نتایج شبیه‌سازی در جدول ۲) و شدت تابش رادیکال  $CH^*$  (نتایج تجربی شکل ۴) نمودار تغییرات غلظت مولی و شدت تابش رادیکال  $CH^*$  با افزایش درصد هیدروژن مخلوط سوخت در شکل ۵ رسم شده است. نتایج شکل ۵ نسبت به شعله بدون هیدروژن بی‌بعد شده است تا ارقام آن قابل مقایسه باشد. مشاهده می‌شود که شدت تابش رادیکال  $CH^*$  و غلظت مولی  $CH^*$  با افزایش درصد هیدروژن سوخت به‌صورت تقریباً خطی کاهش می‌یابد. در صورتی که این دو کمیت نسبت به همدیگر سنجیده شود، ضریب همبستگی ریاضی این دو کمیت ۰/۹۸ خواهد بود. این نتیجه تأییدکننده ارتباط خطی شدت تابش رادیکال  $CH^*$  در طول موج ۴۳۰ نانومتر و غلظت مولی آن است.

جدول ۲- نتایج حل عددی جرم مولکولی، چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، دما و کسر مولی فرآورده‌های سه شعله آزمون

Table 2- Numerical results of molecular mass, density, specific heat, temperature and molar fraction of the products of the three experimented flames

% $H_2$	MW	$\rho$	$c_p$	T	$H_2O$	$CO_2$	OH	CH
0	25.1	0.17	1.62	1987	16.3	7.6	6.5	4.7
11	24.8	0.16	1.61	1999	17.1	7.1	6.9	4.2
19	24.8	0.16	1.59	2010	17.7	6.8	7.1	3.5

یکای جرم مولی  $(\frac{kg}{kmol})$ ، یکای چگالی  $(\frac{kg}{m^3})$ ، یکای ظرفیت گرمایی ویژه  $(\frac{kJ}{kgK})$ ، یکای دما (K) و کسر مولی گونه‌های فرآورده برحسب درصد بیان شده است. در مورد OH ضریب  $10^3$  و در مورد  $CH^*$  ضریب  $10^6$  لحاظ شده است تا اعداد قابل مقایسه باشد.

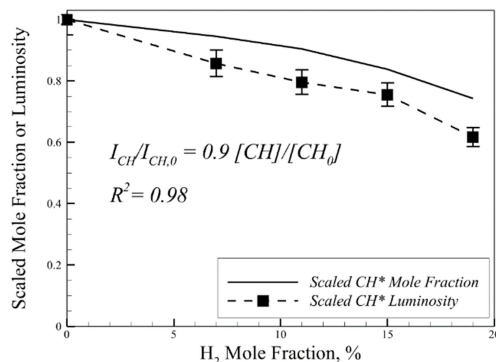


Figure 5- The effect of the hydrogen addition on the simulated mole fraction and the experimented  $CH^*$  chemiluminescence

شکل ۵ - اثر افزودن هیدروژن بر شدت تابش تجربی و غلظت مولی حل عددی  $CH^*$

در ساختار شعله جریان متقابل پیش‌آمیخته دو جبهه شعله متمایز وجود دارد. در سمت نازل پیش‌آمیخته غنی از سوخت در نسبت هم‌ارزی ثابت، در ناحیه‌ای که سرعت محلی محوری جریان هوا و سوخت برابر سرعت شعله متناظر با آن نسبت هم‌ارزی باشد، یک جبهه شعله پیش‌آمیخته نازک شکل می‌گیرد (شکل ۶). این ساختار شعله در مراجع [۲] و [۲۷] مفصل توصیف شده است. در ناحیه شعله پیش‌آمیخته، سرعت شعله متناسب با نرخ کرنش محلی شعله خواهد بود. برای شعله ۰٪ و ۱۱٪ هیدروژن، نسبت هم‌ارزی نازل پیش‌آمیخته برابر ۱/۷ است (جدول ۱) و شیب تغییرات سرعت محوری با فاصله این دو شعله (نرخ کرنش محلی) تقریباً برابر است. اما در شعله سوم با درصد هیدروژن ۱۹٪، به دلیل افزایش سرعت شعله، نرخ کرنش محلی افزایش یافته است. در سمت نازل هوا، یک جبهه شعله غیرپیش‌آمیخته تشکیل می‌شود. هیدروکربن‌های نسوخته و

اضافی حاصل از واکنش جبهه پیش‌آمیخته اولیه، بعد از نفوذ به سمت دیگر نقطه سکون نازل (محلی که سرعت محوری جریان صفر می‌شود یعنی  $Y_{st} \approx 1.1 \text{ cm}$ )، در مجاورت هوای اضافی نازل فوقانی قرار می‌گیرد و یک جبهه شعله غیرپیش‌آمیخته تشکیل می‌شود. همچنین در شکل ۶ مشاهده می‌شود نرخ کرنش کلی جریان  $(\frac{\partial u_{ax}}{\partial y})$  و ساختار جبهه شعله غیرپیش‌آمیخته سه شعله شباهت بسیاری دارد. اما ساختار جبهه شعله پیش‌آمیخته آن‌ها (ناحیه‌ای که با خط چین دایره بزرگ‌نمایی شده) تابع نسبت هم‌ارزی و متفاوت است.

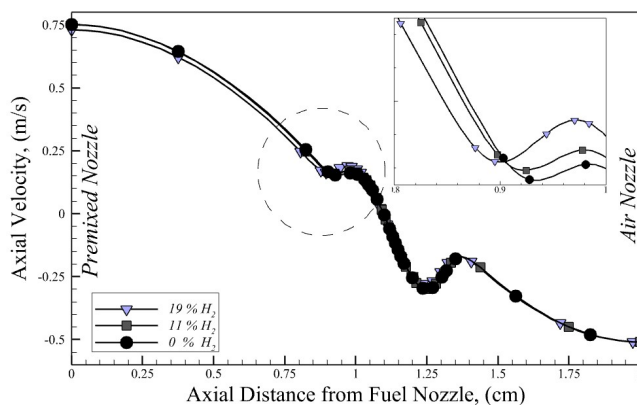


Figure 6- The effects of the hydrogen addition on the simulated axial velocity along axis  
 شکل ۶- اثر افزودن هیدروژن بر سرعت محوری شبیه‌سازی شده جریان

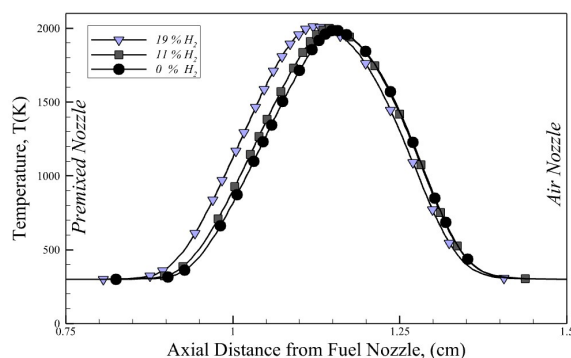


Figure 7- The effects of the hydrogen addition on the simulated temperature along axis  
 شکل ۷- اثر افزودن هیدروژن بر دمای میدان جریان در راستای محور

شکل ۷ توزیع دمای محوری سه شعله را با یکدیگر مقایسه می‌کند. اختلاف دمای بیشینه سه شعله ۲۳ کلوین است و محل بیشینه شدن دمای کلی شعله، در مجاورت نقطه سکون،  $Y_{st} \approx 1.1 \text{ cm}$  است. ناحیه‌ای که در آن گرادیان دما وجود دارد به‌طور تقریبی جبهه شعله را مشخص می‌کند. در شبیه‌سازی انجام شده، ضخامت لایه حرارتی جبهه پیش‌آمیخته شعله برابر  $l_f \approx 2 \text{ mm}$  است و برای هر سه شعله تقریباً برابر است. به دلیل کاهش نسبت هم‌ارزی شعله سوم و افزایش سرعت شعله، جبهه شعله اندکی به سمت نازل سوخت حرکت کرده است. زیرا هرچه سرعت شعله افزایش یابد محل شعله به سمت نازل مربوطه حرکت می‌کند تا در محل جدید، سرعت محوری بالاتر رفته و تعادل بین سرعت محوری و سرعت شعله برقرار شود. به نظر می‌رسد توزیع دمای ناحیه غیرپیش‌آمیخته دو شعله نخست شباهت بسیاری با یکدیگر دارد؛ اما اختلاف اندکی با شعله سوم دارند که ناشی از تفاوت نسبت هم‌ارزی دو شعله نخست با شعله سوم است.

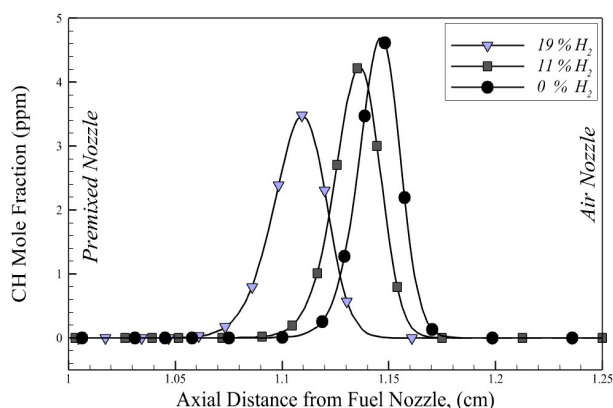


Figure 8- The effects of the hydrogen addition on the simulated CH\* mole fraction along axis

شکل ۸ - اثر افزودن هیدروژن بر محل تشکیل CH\* در راستای محور

شکل ۸ ناحیه تشکیل رادیکال CH\* را تابع فاصله از نازل سوخت نمایش می‌دهد. همان‌طور که پیش‌تر نیز ذکر شد، به‌طور کلی، با افزایش درصد هیدروژن سوخت، غلظت CH\* در فرآورده کاهش می‌یابد. تفاوت عمده سه شعله در محل تشکیل گونه میانی CH\* است. بیشینه غلظت CH\* همواره در بالای نقطه سکون (حد فاصله نقطه سکون و نازل هوا) و در بخش جبهه غیرپیش‌آمیخته شعله است. این گونه، بر اثر وجود هیدروکربن نسوخته در جبهه شعله پیش‌آمیخته، حرکت خود را از سمت پایین نقطه سکون آغاز کرده و با نفوذ به بخش غیرپیش‌آمیخته، در مجاورت هوای نازل فوقانی واکنش می‌دهد و مصرف می‌شود. هرچه میزان هیدروژن شعله افزایش یابد، مقدار بیشینه CH\* کاهش یافته و محل تشکیل آن به سمت جبهه پیش‌آمیخته متمایل خواهد شد. ضخامت لایه تشکیل و مصرف CH\* به مراتب کمتر از ضخامت لایه حرارتی شعله است و با افزایش هیدروژن سوخت از مقدار صفر تا ۱۹٪ از مقدار  $l_{CH} \approx 0.5 \text{ mm}$  به مقدار  $l_{CH} \approx 0.6 \text{ mm}$  افزایش می‌یابد.

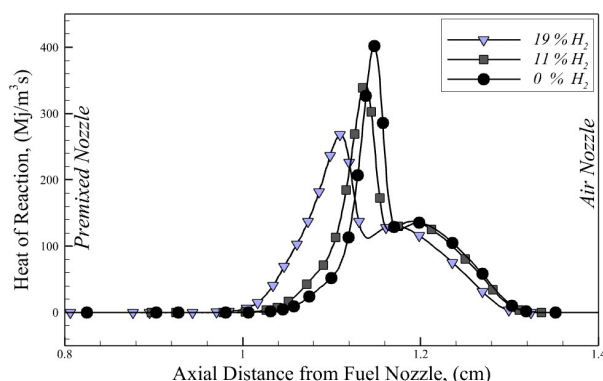


Figure 9- The effects of the hydrogen addition on the simulated heat release rate along axis

شکل ۹ - اثر افزودن هیدروژن بر نرخ آزادسازی حرارت شعله پایا در راستای محور

شکل ۹ توزیع حرارت واکنش‌های شیمیایی در راستای محوری شعله را نمایش می‌دهد. عمده حرارت واکنش‌های شیمیایی در جبهه غیرپیش‌آمیخته شعله، حدفاصل نقطه سکون تا نازل هوا آزاد می‌شود. با افزایش هیدروژن به سوخت، همانند ضخامت لایه CH\*، ضخامت لایه آزادسازی حرارت شعله افزایش و مدار بیشینه نرخ آزادسازی حرارت شعله کاهش می‌یابد. به‌صورت کلی، نرخ آزادسازی حرارت هر سه شعله تقریباً برابر است و با یکدیگر اختلافی کمتر از ۷٪ دارد. همان‌طور که

پیش‌تر نیز ذکر شد، کاهش غلظت مولی  $CH^*$  به معنی کاهش نرخ آزادسازی حرارت نیست؛ زیرا هرچند غلظت مولی  $CH^*$  با افزایش درصد هیدروژن سوخت کاهش یافته است، اما نرخ آزادسازی حرارت کلی شعله افزایش (اندکی) دارد.

### ساختار دینامیک شعله

در این بخش نتایج تحریک آکوستیکی سه شعله جدول ۱ در محدوده فرکانسی ۲۰-۳۵۰ هرتز و دامنه فشار ثابت، تحلیل و بررسی شده است. در هر فرکانس ثابت دست کم ۳۰ سیکل تحریک، داده‌برداری و پردازش شده است. نتایج لحظه‌ای نرخ آزادسازی حرارت بی‌بعد شده شعله در چهار فرکانس ثابت ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ هرتز، به کمک معادله (۶) استخراج و در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. برای درک بهتر رفتار دینامیکی شعله، تمامی مقادیر در این نمودار با شعله بدون هیدروژن بی‌بعد شده است. مشاهده می‌شود تأثیر امواج آکوستیکی بر روی نرخ آزادسازی حرارت سه شعله یکسان نیست و پاسخ نرخ آزادسازی حرارت سه شعله در هر فرکانس، دامنه و میانگین متفاوتی دارد. اما تمامی شعله‌ها، فرکانس تحریک را در پاسخ نرخ آزادسازی حرارت خود حفظ کرده‌اند.

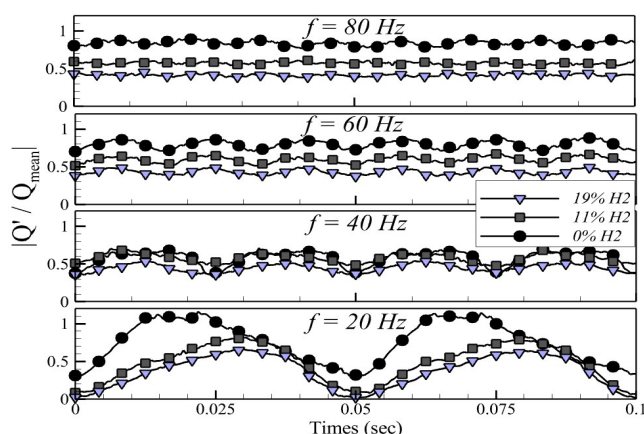


Figure 10- The effects of hydrogen addition on the response of heat release rate of the counterflow flame (at  $f = 20, 40, 60$  and  $80$  Hz)

شکل ۱۰- اثرات هیدروژن بر پاسخ نرخ آزادسازی حرارت شعله جریان متقابل به تحریک آکوستیکی ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ هرتز

در فرکانس ۲۰ هرتز، شعله فاقد هیدروژن بیشینه دامنه تغییرات و میانگین نرخ آزادسازی حرارت را دارد و با افزایش هیدروژن به سوخت، هم دامنه تغییرات و هم میانگین نرخ آزادسازی حرارت کاهش پیدا می‌کند. اما هرچه مقدار هیدروژن افزایش می‌یابد، مقدار مینیمم نرخ آزادسازی حرارت در نقاط مینیمم سیکل به صفر نزدیکتر خواهد شد. این بدین معناست، با افزایش هیدروژن در تحریک آکوستیکی ۲۰ هرتز شعله در نقاط مینیمم به صورت لحظه‌ای تا نزدیکی حد خاموشی خواهد رفت. پدیده مذکور سبب می‌شود در فرکانس‌های پایین، مقدار اولیه تابع پاسخ شعله با افزودن هیدروژن بالا برود. زیرا نسبت دامنه تغییرات به میانگین نرخ حرارت افزایش خواهد یافت. علت پدیده مذکور افزایش نرخ کرنش محلی شعله، به دلیل حضور امواج آکوستیکی است. هرچه درصد هیدروژن سوخت افزایش می‌یابد، نرخ کرنش محلی شعله در حضور امواج آکوستیکی بالاتر می‌رود و به نقطه خاموشی نزدیکتر خواهد شد.

با افزایش فرکانس تحریک آکوستیکی شعله و رسیدن به میزان ۴۰ هرتز، مشاهده می‌شود تأثیر امواج آکوستیکی بر میانگین سه شعله یکسان نیست. شعله فاقد هیدروژن با کاهش میانگین نرخ آزادسازی حرارت مواجه است اما دو شعله دارای هیدروژن افزایش مقدار میانگین نرخ آزادسازی حرارت دارند. علت این پدیده عدم نزدیک شدن شعله‌های محتوی هیدروژن به نقطه خاموشی است. اما در هر سه شعله کاهش دامنه تغییرات نرخ آزادسازی حرارت مشهود است. به‌طور کلی می‌توان ادعا کرد

با افزایش دامنه نوسانات آکوستیکی میدان جریان، دامنه تغییرات نرخ آزادسازی حرارت شعله کاهش خواهد یافت و از مقدار هیدروژن سوخت مستقل است. در فرکانس‌های بالاتر (۶۰ و ۸۰ هرتز) تأثیر امواج آکوستیکی بر نرخ آزادسازی حرارت شعله میرا می‌شود و نرخ آزادسازی حرارت میانگین شعله، تنها تحت اثر غلظت هیدروژن سوخت تغییر خواهد کرد. برای اطمینان یافتن از فرکانس پاسخ نرخ آزادسازی حرارت، از نتایج خروجی در فرکانس ۲۰ هرتز، تبدیل فوریه سریع<sup>۱</sup> گرفته شده است. نتایج تبدیل فوریه سریع در نمودار شکل ۱۱ ترسیم شده است. دامنه تغییرات نرخ آزادسازی حرارت بی‌بعد شده در شعله فاقد هیدروژن ۰/۴۳، دامنه تغییرات شعله با ۰/۱۱ هیدروژن در سوخت ۰/۳۹ و دامنه تغییرات شعله دارای ۰/۱۹ هیدروژن ۰/۳۳ محاسبه شده است. در صورتی که تمامی دامنه‌ها با مقدار بیشینه یعنی ۰/۴۳ مقیاس شود، نتیجه با نمودار ترسیم شده در شکل ۱۱ متناظر خواهد بود. در تبدیل فوریه سریع، پاسخ نرخ آزادسازی حرارت، تنها فرکانس ۲۰ هرتز و مضارب صحیح آن مشاهده می‌شود.

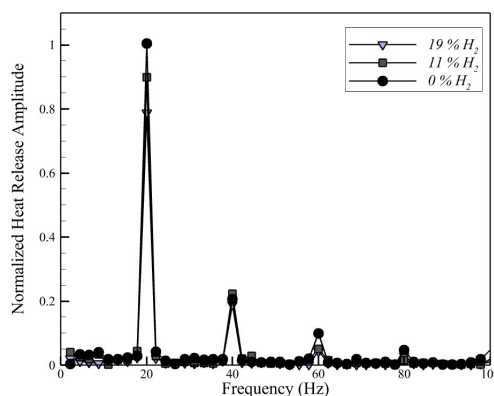


Figure 11- The effects of hydrogen addition on the FFT of the heat release rate of the counterflow flame ( $f = 20$  Hz)

شکل ۱۱- اثر هیدروژن بر تبدیل فوریه سریع از نرخ آزادسازی حرارت شعله جریان متقابل در فرکانس تحریک آکوستیکی ۲۰ هرتز

پیش از بررسی تابع دینامیکی پاسخ شعله، دینامیک شعله تحریک شده و شعله پایا بررسی شده است. بدین منظور مقدار کمیت‌های میانگین شعله تحریک شده در هر فرکانس با مقدار همان کمیت در حالت پایای شعله بی‌بعد شده است تا مشخص شود نسبت به حالت بدون تحریک، چگونه تغییر کرده است. نخست، کمیت ضخامت لایه  $CH^*$  شعله تحریک شده به ضخامت لایه  $CH^*$  شعله پایا در شکل ۱۲ مقایسه شده است. رفتار نمودار با تغییر غلظت هیدروژن در سوخت، تغییرات چشمگیری دارد. ضخامت میانگین لایه  $CH^*$  دو شعله تحریک شده ۰٪ و ۰/۱۱ هیدروژن، به‌طور کلی کمتر از شعله پایای متناظر با هریک است. اما در مورد شعله حاوی ۰/۱۹ هیدروژن ضخامت لایه  $CH^*$  شعله تحریک شده در سراسر بازه فرکانسی تحریک، بیش از شعله پایای بوده و حساسیت کمتری نسبت به نوسانات آکوستیکی از خود نشان داده است. در این شعله بعد از فرکانس ۹۰ هرتز، ضخامت میانگین لایه  $CH^*$  شعله تحریک شده به مقدار ۱/۲ برابر ضخامت لایه  $CH^*$  شعله پایا رسیده و ثابت مانده است. دو شعله دیگر (۰٪ و ۰/۱۱ هیدروژن)، هم به‌صورت هندسی و هم به‌صورت شدت تابش رادیکال  $CH^*$  دچار تغییرات نرخ آزادسازی حرارت شده‌اند. در این دو شعله با افزایش فرکانس به مقادیر بیش از ۱۳۰ هرتز، ضخامت لایه  $CH^*$  میانگین شعله تحریک شده، ثابت و تقریباً برابر مقدار شعله پایای متناظر شده است.

<sup>1</sup> Fast Fourier Transform (FFT)

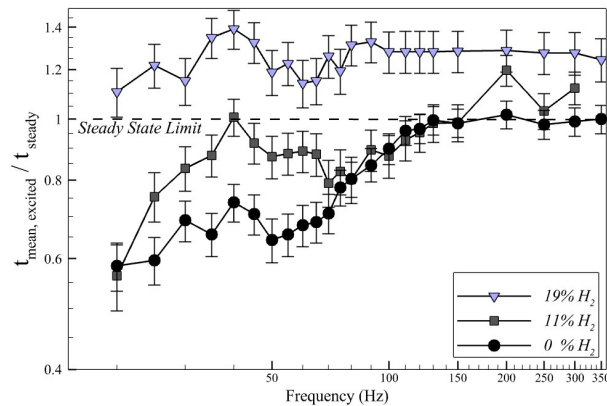


Figure 12- The ratio of mean excited thickness to the steady-state thickness of the CH\* layer of the counterflow flame  
 شکل ۱۲ - نسبت ضخامت لایه CH\* میانگین شعله تحریک شده به حالت پایا

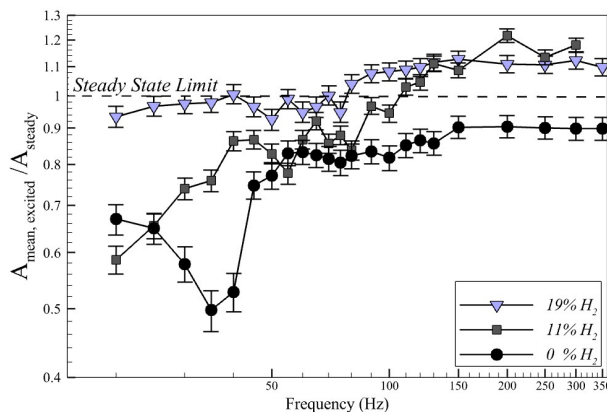


Figure 13- The ratio of mean excited area to the steady-state area of the CH\* layer of the counterflow flame  
 شکل ۱۳ - نسبت سطح لایه CH\* میانگین شعله تحریک شده به حالت پایا

سطح شعله میانگین تحریک شده نسبت به سطح شعله پایا، در محدوده فرکانسی ۲۰ الی ۳۵۰ هرتز در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که شعله فاقد هیدروژن، بیشترین تغییرات سطح را نسبت به حالت پایا در مقایسه با شعله‌های دارای هیدروژن، از خود نشان داده است. مقدار نهایی سطح میانگین شعله هیچ یک از سه شعله آزمون، به مقدار حالت پایا نمی‌رسد. اما تغییرات سطح شعله تحریک شده به پایا در فرکانس‌های بالاتر از ۱۳۰ هرتز ناچیز است. هنگامی که میزان هیدروژن سوخت شعله به ۱۹٪ می‌رسد، شعله کمترین تغییرات سطح میانگین را نسبت به شعله‌های محتوی مقدار کمتر هیدروژن از خود نشان می‌دهد. به بیان بهتر، حساسیت هندسی شعله تحریک شده (ضخامت و سطح) با افزایش درصد هیدروژن مخلوط هیتان، کاهش می‌یابد و مکانیزم تغییرات نرخ آزادسازی حرارت شعله از طریق نزدیک شدن به نقطه خاموشی محلی خواهد بود.

شکل ۱۴ نرخ آزادسازی حرارت شعله تحریک شده را نسبت به شعله پایا نمایش می‌دهد. نرخ آزادسازی میانگین حرارت شعله دارای ۱۹٪ هیدروژن کمترین حساسیت را نسبت به فرکانس امواج آکوستیکی از خود نشان داده است و در محدوده ۱/۰۵ تا ۱/۲۵ تغییر کرده است. اما در شعله‌های ۰٪ و ۱۱٪ هیدروژن، میزان تغییرات این کمیت از مقدار ۰/۷ الی ۱/۰۳ است. حساسیت نرخ آزادسازی حرارت در این دو شعله تا فرکانس ۱۳۰ هرتز مشهود است. اما شعله دارای ۱۹٪ هیدروژن در فرکانس‌های بالاتر از ۹۰ هرتز تغییرات نرخ آزادسازی حرارت میانگین چندانی از خود نشان نداده است. هر سه نمودار ضخامت،

سطح شعله و نرخ آزادسازی حرارت شعله همبستگی مشهودی در رفتار فرکانسی از خود نشان می دهند. اما عدم قطعیت نتایج ضخامت شعله، به دلیل امکان وجود حرکات تصادفی شعله بیشتر از دو نمودار دیگر است.

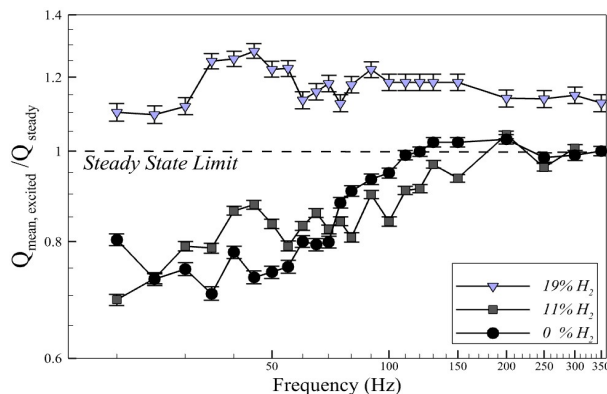


Figure 14- The ratio of mean excited heat release to the steady-state heat release of the counterflow flame

شکل ۱۴- نسبت نرخ آزادسازی حرارت شعله تحریک شده به حالت پایا

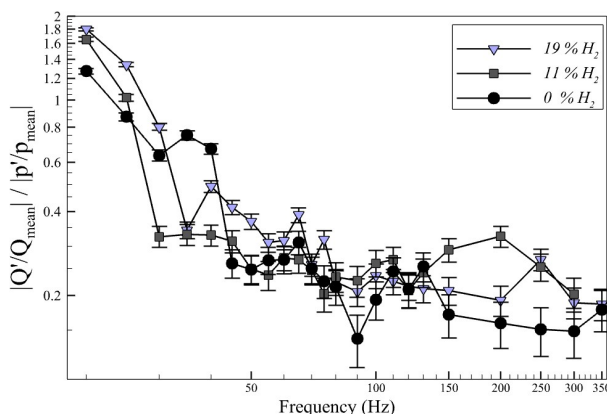


Figure 15- The effects of the hydrogen on the response function of the counterflow flame

شکل ۱۵- اثر افزودن هیدروژن بر تابع پاسخ شعله جریان متقابل پیش آمیخته جزئی

به کمک معادلات (۱) و (۶) تابع پاسخ شعله‌های آزمون در محدوده فرکانسی ۲۰ الی ۳۵۰ هرتز استخراج شده است. به دلیل آن که نرخ تغییرات پاسخ شعله، در بازه‌های فرکانسی کمتر از ۱۰۰ هرتز بیشتر از بازه فرکانسی بالای ۱۰۰ هرتز است، از نمایش لگاریتمی استفاده شده است. مقدار اولیه تابع پاسخ شعله در هر سه حالت از مرتبه یک است. این حد، به‌عنوان حد پایین پاسخ شعله مشهور است و در مراجع مختلفی مانند [۲۸] قبلاً گزارش شده است. تعبیر این رفتار دینامیک این است که در فرکانس‌های پایین، هر دامنه امواج آکوستیکی که به شعله برخورد کند سبب می‌شود دامنه نرخ آزادسازی حرارت نیز با همان مرتبه از دامنه نوسان کند. در پاسخ شعله‌های مخروطی حاوی هیدروژن نیز پیش‌تر این موضوع مشاهده شده است [۹]، [۷] و مختص شعله جریان متقابل نیست.

خاصیت مهم دیگر افزودن هیدروژن بر تابع پاسخ دینامیکی شعله، افزایش سرعت میرایی پاسخ است. در شکل ۱۵ پاسخ شعله‌های حاوی هیدروژن در فرکانس ۳۰ هرتز، از مقدار واحد به‌صورت ناگهانی به مقدار کمتر از ۰/۴ کاهش پیدا کرده است. اما شعله فاقد هیدروژن، تا فرکانس ۴۰ هرتز مقداری بیش از ۰/۶ دارد و با نرخ کمتری میرا می‌شود. این افزایش میرایی پاسخ

با افزایش هیدروژن در شعله‌های دیگری همچون مرجع [۹] نیز گزارش شده است. مقدار اولیه تابع پاسخ، با افزایش درصد هیدروژن مخلوط هیتان شعله، افزایش دارد. علت این امر را می‌توان به کمک نمودار شکل ۱۰ توجیه کرد. با افزودن هیدروژن به شعله جریان متقابل پیش‌آمیخته متان-هوا، سرعت شعله افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی امواج آکوستیکی به‌صورت محلی، شعله را به شرایط خاموشی نزدیک می‌کند و سبب می‌شود مقدار نرخ آزادسازی حرارت میانگین شعله کاهش می‌یابد. به دلیل اینکه نرخ آزادسازی حرارت میانگین شعله در مخرج تابع پاسخ شعله اثر می‌گذارد، اندازه تابع پاسخ شعله در فرکانس‌های بسیار کم (۲۰ هرتز) افزایش چشمگیری دارد.

با افزایش فرکانس امواج آکوستیکی تحریک شعله به مقدار بیش از ۲۵۰ هرتز تغییرات تابع پاسخ، مستقل از اینکه درصد هیدروژن سوخت چه میزان باشد، به مقدار کمتر از ۰/۲ کاهش پیدا می‌کند. در چنین شرایطی مقیاس زمانی اثرگذاری امواج آکوستیکی بر نرخ کرنش محلی شعله بسیار کمتر از حدی است که بتواند بر روی مشخصات هندسی شعله اثرگذار باشد و نرخ آزادسازی حرارت شعله را تغییر دهد. در این گستره فرکانسی، نوسانات نرخ آزادسازی حرارت میرا شده است و عدم قطعیت نتایج بیش از محدوده فرکانس پایین‌تر از ۱۰۰ هرتز است.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثرات افزودن هیدروژن بر حالت پایا و پاسخ دینامیک شعله جریان متقابل پیش‌آمیخته جزئی متان-هوا بررسی شد. نخست به کمک شبیه‌سازی عددی یک‌بعدی، ساختار شعله پایا و بدون تحریک آکوستیکی شعله جریان متقابل متان-هوا تحت اثر افزودن هیدروژن بحث شد. نتایج نشان داد که دو جبهه شعله در میدان جریان وجود دارد. یک جبهه شعله پیش‌آمیخته غنی از سوخت و دیگری یک جبهه شعله غیرپیش‌آمیخته که از هیدروکربن‌های نسوخته جبهه اول و هوای اضافی نازل دیگر، در بالای نقطه سکون شکل می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که رادیکال  $CH^*$  در ناحیه بین دو جبهه شعله تشکیل و مصرف می‌شود. با افزودن هیدروژن مقدار  $CH^*$  کاهش و سرعت محلی شعله، در جبهه پیش‌آمیخته افزایش یافت. نتایج تجربی نورتابی شیمیایی رادیکال  $CH^*$  سه شعله آزمون در حالت پایا نیز نشان داد که با افزودن هیدروژن شدت تابش این گونه میانی کاهش می‌یابد. همبستگی بین غلظت مولی و شدت تابش رادیکال  $CH^*$  نشان داد این دو کمیت رابطه خطی با هم دارد. تحریک آکوستیکی شعله جریان متقابل نشان داد که فرکانس ورودی در نتایج خروجی حفظ می‌شود. در فرکانس‌های پایین (۲۰ هرتز) شعله‌های حاوی هیدروژن تا نزدیکی خاموشی محلی پیش می‌روند و سبب می‌شود که نرخ آزادسازی حرارت میانگین کاهش و مقدار اولیه تابع پاسخ شعله در فرکانس مذکور افزایش یابد. اثرات تحریک آکوستیکی بر روی شعله‌های حاوی هیدروژن سریع‌تر از شعله متان-هوا میرا می‌شود. این موضوع در شعله‌های مخروطی نیز قبلاً گزارش شده است. تابع پاسخ شعله جریان متقابل پیش‌آمیخته جزئی همانند سایر شعله‌های ساده دیگر (شعله مخروطی)، به‌صورت یک فیلتر پایین‌گذر عمل می‌کند؛ یعنی فرکانس‌های کمتر از ۱۰۰ هرتز را بر روی شعله اعمال و فرکانس‌های بالاتر از ۲۵۰ هرتز را فیلتر می‌کند.

## تضاد منافع

نویسندگان مقاله از هرگونه ارتباط با شخص یا سازمانی که بر نتایج این پژوهش تأثیر بگذارد اجتناب کرده‌اند و وجود هر نوع منافع مالی که مراحل طراحی، جمع‌آوری داده، تجزیه و تحلیل و انتشار نتایج علمی تأثیر بگذارد را رد می‌کنند.

## مشارکت نویسندگان

**اختردانش:** ایده‌پرداز، جمع‌آوری داده، آنالیز داده، پیاده‌سازی شبیه‌سازی، اعتبارسنجی، آشکارسازی نتایج، آزمایشگاه تجربی، تأمین منابع، نگارش -پیش‌نویس اصلی، بازنگری و ویرایش؛ **حسین‌خانی:** آزمایشگاه تجربی، جمع‌آوری داده، آنالیز داده، آشکارسازی نتایج، نگارش - بازنگری و ویرایش؛ **فرشچی:** ایده‌پردازی، آنالیز داده، شبیه‌سازی عددی، اعتبارسنجی، آزمایشگاه تجربی، تأمین منابع، نظارت و راهنمایی، نگارش - بازنگری و ویرایش.

## مراجع

- [1] P. Berta, I. K. Puri, and S. K. Aggarwal, "Structure of partially premixed n-heptane-air counterflow flames," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 30, no. 1, pp. 447–453, 2005.
- [2] H. Xue and S. K. Aggarwal, "Structure and Extinction of Heptane / Air Introduction," *AIAA J.*, vol. 40, no. 11, 2002.
- [3] X. Yang, T. Wang, Y. Zhang, H. Zhang, Y. Wu, and J. Zhang, "Hydrogen effect on flame extinction of hydrogen-enriched methane/air premixed flames: An assessment from the combustion safety point of view," *Energy*, vol. 239, no. 2022, p. 122248, 2022.
- [4] G. S. Jackson, R. Sai, J. M. Plaia, C. M. Boggs, and K. T. Kiger, "Influence of H<sub>2</sub> on the response of lean premixed CH<sub>4</sub> flames to high strained flows," *Combust. Flame*, vol. 132, no. 3, pp. 503–511, 2003.
- [5] A. Potnis, V. R. Unni, H. G. Im, and A. Saha, "Extinction of non-equidiffusive premixed flames with oscillating strain rates," *Combust. Flame*, vol. 234, p. 111617, 2021.
- [6] P. Palies, D. Durox, T. Schuller, and S. Candel, "The combined dynamics of swirler and turbulent premixed swirling flames," *Combust. Flame*, vol. 157, no. 9, pp. 1698–1717, Sep 2010.
- [7] F. H. Vance, Ç. Alanyalıoğlu, and C. Hasse, "Analysis of Lewis number effects on dynamic response of laminar premixed flames," *Combust. Flame*, vol. 248, 2023.
- [8] C. H. Sohn, S. H. Chung, S. R. Lee, and J. S. Kim, "Structure and acoustic-pressure response of hydrogen-oxygen diffusion flames at high pressure," *Combust. Flame*, vol. 115, no. 3, pp. 299–312, 1998.
- [9] A. Ghani and W. Polifke, "Control of intrinsic thermoacoustic instabilities using hydrogen fuel," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 38, no. 4, pp. 6077–6084, 2021.
- [10] Y. Jung, M. J. Lee, and N. Il Kim, "Direct prediction of laminar burning velocity and quenching distance of hydrogen-air flames using an annular stepwise diverging tube (ASDT)," *Combust. Flame*, vol. 164, pp. 397–399, 2016.
- [11] A. G. Gaydon, *The spectroscopy of flames*. 1974.
- [12] C. S. Panoutsos, Y. Hardalupas, and A. M. K. P. Taylor, "Numerical evaluation of equivalence ratio measurement using OH\* and CH\* chemiluminescence in premixed and non-premixed methane-air flames," *Combust. Flame*, vol. 156, no. 2, pp. 273–291, 2009.
- [13] Y. Hardalupas and M. Orain, "Local measurements of the time-dependent heat release rate and equivalence ratio using chemiluminescent emission from a flame," *Combust. Flame*, vol. 139, no. 3, pp. 188–207, 2004.
- [14] M. A. Akhtardanesh, M. Khadem Alrezaeian, and M. Farshchi, "the Acoustic Wave Shape Effects on the Dynamic Response of the Premixed Bunsen Flame," *7th Conf. Mech. Aerosp. Eng.*, vol. 7, pp. 1–19, 2022.
- [15] M. A. Akhtardanesh, M. Khadem Alrezaeian, and M. Farshchi, "Interaction of acoustic waves with a laminar counterflow flame," in *9th National Conference of Acoustical Society of Iran*, Tehran: Acoustical Society of Iran, 2023.
- [16] M. A. Akhtardanesh, M. Khadem Alrezaeian, M. J. Hosseinkhani, and M. Farshchi, "An experimental study on Bunsen flame acoustic extinction," in *The 21st International Conference of Iranian Aerospace Association*, Tehran, 2022.
- [17] M. A. Akhtardanesh, M. J. Hosseinkhani, and M. Farshchi, "Acoustic Extinction of Partially Premixed Counterflow flame," *J. Engine Res.*, vol. 70, no. 3, pp. 39–52, 2023.
- [18] M. A. Akhtardanesh, M. Khadem Alrezaeian, and M. Farshchi, "A Comparison between Methane and Propane Counterflow flame Acoustic Excitation in the Partially Premixed Regime," in *20th Fluid Dynamics Conference*, Tehran: the physics society of iran, 2023.
- [19] T. Schuller, D. Durox, and S. Candel, "Dynamics of and noise radiated by a perturbed impinging premixed jet flame," *Combust. Flame*, vol. 128, no. 1–2, pp. 88–110, 2002.
- [20] B. B. Skabelund, C. D. Jenkins, E. B. Stechel, and R. J. Milcarek, "Thermodynamic and emission analysis of a hydrogen/methane fueled gas turbine," *Energy Convers. Manag. X*, vol. 19, no. x, p. 100394, 2023.
- [21] D. Durox, T. Schuller, N. Noiray, and S. Candel, "Experimental analysis of nonlinear flame transfer functions for different flame geometries," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 32 I, no. 1, pp. 1391–1398, 2009.
- [22] A. E. Lutz, R. J. Kee, J. F. Grear, "OPPDIF: A Fortran Program for Computing Opposed-Flow Diffusion Flames," 1997.
- [23] R. J. Kee, G. Dixon-Lewis, J. Warnatz, M. E. Coltrin, J. A. Miller, and H. K. Moffat, "A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics," New Mexico, 1989.
- [24] M. Frenklach, H. Wang, M. Goldenberg, G. P. Smith, and D. M. Golden, "GRI-MECH: An optimized detailed

- chemical reaction mechanism for methane combustion. Topical report, September 1992-August 1995," *Combust. Flame*, vol. 244, p. 112286, 1995.
- [25] R. V. Ravikrishna and N. M. Laurendeau, "Laser-induced fluorescence measurements and modeling of nitric oxide in counterflow partially premixed flames," *Combust. Flame*, vol. 122, no. 4, pp. 474-482, 2000.
- [26] A. M. Cormack, "Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications," *J. Appl. Phys.*, vol. 34, no. 9, pp. 2722-2727, 1963.
- [27] S. K. Aggarwal, "Extinction of laminar partially premixed flames," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 35, no. 6, pp. 528-570, 2009.
- [28] W. Polifke and C. Lawn, "On the low-frequency limit of flame transfer functions," *Combust. Flame*, vol. 151, no. 3, pp. 437-451, Nov 2007.

## English Abstract

# The Effect of Hydrogen Addition on the Acoustic Response of a Partially Premixed Counterflow Flame

Mohammad Ali Akhtardanesh<sup>1</sup>, Mohammad Javad Hosseinkhani<sup>2</sup>, Mohammad Farshchi<sup>3\*</sup>

1- Aerospace Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, mohammadali.akhtardanesh@ae.sharif.edu

2- Aerospace Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, mj.hosseinkhah@ae.sharif.edu

3- Aerospace Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, farshchi@sharif.edu

\*Corresponding author

(Received: 2024/05/08, Received in revised form: 2024/06/05, Accepted: 2024/06/29)

Hydrogen plays a key role in reducing reliance on fossil fuels in various energy production systems. While its use offers a promising alternative to carbon-based fuels, it presents significant challenges. The transition from carbon-rich hydrocarbons to hydrogen-based energy systems requires a thorough understanding of its dynamic effects. This study investigates the impact of hydrogen addition on the dynamic behavior of a partially premixed methane-air counterflow flame through experimental analysis and one-dimensional numerical simulations. The study examines the steady-state flame structure and response without acoustic excitation, assessing the influence of added hydrogen on the flame's heat release rate and thermal region thickness. Employing an acoustically excitable counterflow flame burner setup, the effects of increasing hydrogen content on methane-air flames are explored, and their dynamic response is analyzed using the CH\* radical chemiluminescence method. The findings reveal that while hydrogen addition reduces the intensity of CH\* radical emission in the absence of acoustic excitation, exposure to acoustic waves amplifies oscillations in the heat release rate and CH\* radical emission intensity. This underscores the enhanced flame response function with hydrogen addition.

**Keywords:** Flame Response, Hydrogen, Partially Premixed, Acoustic, Combustion Instability.