



Acoustic extinction of partially premixed counterflow flame

Mohammad Ali Akhtardnesh*, Mohammad Javad Hosseinkhani, Mohammad Farshchi

Aerospace Engineering Faculty, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Acoustic Extinction
Partially Premixed
Counterflow
CH* Chemiluminescence
Spectrometry

ABSTRACT

In spark ignition engines, local or global flame extinction may occur after the ignition spark deactivates, posing challenges to engine stability. Identifying and predicting this phenomenon is crucial for addressing combustion instability. This study investigates the acoustic extinction of a partially premixed methane-air counterflow flame. The focus is on the impact of fuel-air mixing on flame behavior under acoustic waves, using non-intrusive CH* chemiluminescence. One-dimensional steady flame simulations, alongside flame chemiluminescence and spectrometry, are employed to discern differences in flame structure among various mixing regimes. The stagnation point of the reactant jet varies with the momentum flux ratio of upper and lower nozzle flows while mixing effects alter temperature and CH* radical distributions. Experimental results reveal that at low frequencies (~20 Hz), the non-premixed flame, due to its mixing time scale, exhibits lower stability and extinguishes at lower acoustic pressure levels compared to the other flames. Mixing effects on extinction are notable up to 55 Hz, beyond which they become negligible. CH* chemiluminescence analysis of the partially premixed flame shows reduced thickness, area, and average heat release rate at low frequencies compared to the steady-state flame. With increasing frequency, these parameters increase compared to the steady-state flame; however, higher-frequency acoustic waves have minimal impact on flame structure.



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* Corresponding author

E-mail address: mohammadali.akhtardanesh@ae.sharif.edu (M. A. Akhtardnesh)

Received 31 March 2024; Accepted 4 May 2024

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Akhtardnesh MA, Hosseinkhani MJ, Farshchi M. Acoustic extinction of partially premixed counterflow flame. The Journal of Engine Research. 2023 Nov 22;70(3):39-52. doi: [10.22034/ER.2024.2025721.1044](https://doi.org/10.22034/ER.2024.2025721.1044)

خاموشی آکوستیکی شعله جریان متقابل در روش اختلاط پیش آمیخته جزئی

محمدعلی اختردانش*، محمدجواد حسین خانی، محمد فرشچی

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:

خاموشی آکوستیک
پیش آمیخته جزئی
شعله جریان متقابل
نورتابی شیمیایی CH*
طیف‌سنجی

چکیده

در موتورهای جرقه‌ای، پس از غیرفعال شدن جرقه‌زن، تحت شرایط خاصی ممکن است خاموشی محلی یا خاموشی کلی شعله رخ بدهد. شناسایی و پیش‌بینی این پدیده، در رفع ناپایداری احتراق موتورهای جرقه‌ای، نقش مهمی دارد. در این پژوهش، پدیده خاموشی آکوستیک یک شعله جریان متقابل متان-هوا در روش اختلاط پیش آمیخته جزئی، به روش تجربی بررسی شده است. اثر نحوه اختلاط سوخت و هوا بر برهمکنش شعله با امواج آکوستیک، به طور خاص توجه شده و به کمک روش غیرتداخلی نورتابی شیمیایی رادیکال CH* اثرات تحریک آکوستیکی بر ساختار شعله مطالعه شده است. برای مطالعه تفاوت‌های ساختار شعله در روش‌های اختلاطی پیش آمیخته، پیش آمیخته جزئی و غیرپیش آمیخته، شبیه‌سازی یک‌بعدی پایا شعله به همراه نتایج نورتابی شیمیایی و طیف‌سنجی شعله استفاده شده است. نقطه سکون میدان جریان شعله، وابسته به نسبت ممتوم جریان‌های واکنش‌دهنده‌های بالا و پایین است؛ اما توزیع حرارت و توزیع رادیکال CH* تحت اثر اختلاط تغییر پیدا می‌کنند. نتایج تجربی نشان داد، در بسامدهای پایین (حدود ۲۰ هرتز) شعله غیرپیش آمیخته، به دلیل حضور مقیاس زمانی اختلاط، پایداری کمتری نسبت به دو شعله دیگر دارد و در دامنه فشار آکوستیکی ضعیف‌تری خاموش می‌شود. اثرات اختلاط بر پدیده خاموشی تا بسامد ۵۵ هرتز مشهود است و در بسامدهای بالاتر، نحوه اختلاط، اثری بر دامنه امواج آکوستیکی لازم برای خاموشی شعله ندارد. بررسی نورتابی شیمیایی رادیکال CH* شعله جریان متقابل پیش آمیخته جزئی نشان داد، در بسامد پایین شعله تحریک شده نسبت به شعله پایا و بدون تحریک، ضخامت، سطح و نرخ آزادسازی حرارت میانگین کمتری دارد. با افزایش بسامد ضخامت، سطح و نرخ آزادسازی میانگین شعله از شعله پایا بیشتر می‌شود؛ اما افزایش دامنه امواج آکوستیکی در بسامدهای نسبتاً بالا تأثیر محسوسی بر ساختار شعله نخواهد داشت.



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: mohammadali.akhtardanesh@ae.sharif.edu (محمدعلی اختردانش)

دریافت ۱۲ فروردین ۱۴۰۳؛ پذیرش ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۳

شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

۱- مقدمه

برهمکنش امواج صوتی و شعله، در سال ۱۷۷۷ توجه محققان را به خود جلب کرد و در سال ۱۸۶۷ تیندال^۱ از فیزیک این پدیده پرده برداشت. مهار آتش به کمک امواج آکوستیکی، یکی از روش‌های نوین سازگار با محیط زیست است که در حوزه پژوهشی آکوستیک در حال پیگیری است [۱]. از سوی دیگر، محققان حوزه ناپایداری احتراق سعی دارند با شناخت برهمکنش امواج آکوستیک و شعله، پایداری شعله را افزایش دهند و از نوسانات ناخواسته یا خاموشی شعله جلوگیری کنند. پدیده ناپایداری احتراق عبارت است از نوسانات بزرگ دامنه در فشار یا حرارت شعله و به دنبال آن پدیده‌هایی همچون تنش حرارتی، نویز و ارتعاشات، پریدن^۲ و بازگشت شعله^۳ نتیجه خواهد شد [۲].

در موتورهای جرقه‌ای پس از غیرفعال شدن جرقه‌زن، سه حالت ممکن است رخ بدهد: برخی از مطالعات نشان می‌دهد هیچ خاموشی رخ نمی‌دهد؛ بعضی دیگر یک خاموشی محلی را نشان می‌دهند (که با پدیده بازافروزش^۴ همراه است) و حالت سوم خاموشی کلی شعله است [۳]. در این نوع موتورها استفاده از روش احتراق غنی از سوخت^۵ محلی در ناحیه جرقه رایج است. اما به علت برهمکنش هسته شعله^۶ و مخلوط رقیق از سوخت^۷ احاطه کننده شعله (که سرعت انتشار شعله کمتری دارد)، پدیده ناپایداری احتراق ممکن است رخ بدهد [۴].

یکی از روش‌های کاهش دوده و آلاینده‌های نیتروژن، احتراق دما پایین است. اما به علت مشکل ناپایداری احتراق در دماهای پایین، تاکنون استفاده از موتورهای جرقه‌ای دما پایین با چالش مواجه است [۵]. روش‌های عددی، روش‌های آماری [۶] و روش‌های تجربی نورتابی شیمیایی رادیکال CH^* و C_2^* [۷] در مطالعه ناپایداری احتراق موتورهای جرقه‌ای به کار رفته است. از این رو، شناخت پدیده خاموشی آکوستیکی و عوامل مؤثر بر آن اهمیت دارد.

خاموشی آکوستیکی شعله تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله نسبت هم‌ارزی^۸ و محصور بودن شعله است. بررسی یک شعله پیش‌آمیخته مخروطی نشان داده است که بیشترین پایداری شعله در مقابله با خاموشی آکوستیکی برای شعله متان در نسبت هم‌ارزی $\phi = 1.09$ و برای شعله پروپان در نسبت هم‌ارزی $\phi = 1.05$ است. در این نقاط شعله به بیشینه دمای بی‌دررو و بیشترین نرخ آزادسازی حرارت نزدیک است و انرژی آکوستیکی بیشتری برای خاموشی آکوستیک آن نیاز است [۸]. مطالعه شعله‌های M شکل نشان داده است با کاهش قطر محفظه لبه‌های شعله در مجاورت دیواره دچار خاموشی محلی می‌شود. این امر سبب کاهش سطح شعله و اتلاف بخشی از انرژی آکوستیک در برهمکنش شعله با دیواره می‌شود. انرژی آکوستیکی لازم برای خاموشی یک شعله M شکل محصور بیشتر از یک شعله نامحصور است و در تابع پاسخ شعله^۹، دیواره نقش میرا کننده دارد [۹].

پدیده خاموشی را می‌توان به دو بخش خاموشی محلی^{۱۰} (قسمتی از شعله یا خاموشی کلی شعله تقسیم‌بندی کرد. عددی بی‌بعد کارلوویتز^{۱۱} (نسبت مقیاس زمانی واکنش شیمیایی به مقیاس زمانی فیزیکی جریان) برای مطالعه این پدیده کاربرد دارد. پدیده خاموشی شعله زمانی اتفاق می‌افتد که این دو مقیاس زمانی هم‌مرتبه باشد [۱۰].

در نتایج تجربی کارلوویتز خاموشی سوخت‌های گوناگون در بازه ۰.۳ تا ۰.۳۰ تغییر می‌کند [۱۱]. نوک شعله مخروطی نیز در شرایط مختلف (به طور مثال شعله پروپان-هوا در نسبت هم‌ارزی $\phi \geq 1.44$) دچار خاموشی محلی می‌شود. زیرا

¹ Tyndall

² Blow Off

³ Flash Back

⁴ Re-Ignition

⁵ Fuel Rich

⁶ kernel

⁷ Fuel Lean

⁸ Equivalence Ratio

⁹ Flame Response Function

¹⁰ Local Extinction

¹¹ Karlovitz Number

با افزایش نسبت هم‌ارزی، شعاع نوک شعله، سرعت شعله و طول آن به گونه‌ای تغییر می‌کند که عدد کارلوویتز محلی نوک شعله افزایش می‌یابد [۱۲].

بررسی شعله مخروطی غیرپیش‌آمیخته (نفوذی)^۱ با گاز طبیعی نیز نشان داده است، توان امواج آکوستیک لازم برای خاموشی شعله با افزایش بسامد، افزایش خواهد یافت و اثرات تغییر شار جرمی بر این نتیجه اندک است [۱۳]. اخیراً با به‌کارگیری هوش مصنوعی محققان در تلاش هستند اثرات نوع سوخت، ابعاد، دیواره، شدت موج و بسامد و مواردی از این دست را بر پدیده خاموشی آکوستیک شعله مطالعه کنند [۱۴]. امروزه برای بهره‌گیری از ویژگی پایداری شعله‌های پیش‌آمیخته و اجتناب از خطرات احتمالی پیش‌آمیخته بودن سوخت و هوا، روش اختلاط پیش‌آمیخته جزئی توجه مهندسان طراحی مشعل را به خود معطوف کرده است. اثرات افزایش فشار تحریک آکوستیک بر روی یک شعله جریان متقابل به روش طیف‌سنجی نوری و نورتایی شیمیایی^۲ رادیکال CH* بررسی شده تا تغییر نرخ آزادسازی حرارت شعله در مواجهه با امواج آکوستیک مشخص شود. هدف اصلی و نوآوری پژوهش حاضر ایجاد بینش در مورد اثر اختلاط بر پایداری آکوستیک یک شعله ساده و پایه است.

۲- مواد و روش‌ها

شکل ۱ شماتیک آزمونگر تجربی تحریک آکوستیکی شعله جریان متقابل و سایر تجهیزات آزمایشگاه را نمایش می‌دهد. مشعل از دو بخش فوقانی و تحتانی مشابه تشکیل شده است؛ هر بخش یک محفظه آرامش جریان دارد که بسته به روش اختلاط شعله، سوخت، اکسندۀ یا مخلوط هر دو وارد آن می‌شود. بخش انتهایی هر محفظه به یک بلندگو Black Air 12 مجهز است و در محدوده بسامدی ۱۲۰۰-۲۵ هرتز با توان ۵۰۰ وات توانایی تولید امواج آکوستیکی دارد. امواج آکوستیکی توسط یک نرم‌افزار تولید سیگنال سینوسی و بعد از افزایش دامنه به کمک تقویت‌کننده Hertz HCP 1DK به بلندگوها ارسال می‌شود. دامنه امواج آکوستیکی به کمک صوت‌سنج Bruel & Kjaer 2250 (با دقت ± 1.5 dB) اندازه‌گیری شده است. برای تبدیل شدت صوت امواج به دامنه فشاری از معادله^۱ استفاده شده است [۱۵].

$$SPL = 20 \log \left(\frac{P'}{P_{ref}} \right) \quad (1)$$

که $P_{ref} = 20 \mu Pa$ است. برای استخراج نرخ آزادسازی حرارت از روش غیرتداخلی نورتایی شیمیایی رادیکال CH* استفاده شده است. این روش بر مبنای تناسب تابش رادیکال آزاد CH* در طول موج ۴۳۰ نانومتر با نرخ آزادسازی حرارت استوار است [۱۶]. تابش رادیکال CH* به شار جرمی و نسبت هم‌ارزی وابسته است [۱۷]. به منظور تصویربرداری و پیاده‌سازی روش نورتایی شیمیایی از دوربین Nikon D7100 به کمک صافی نوری میان‌گذر 10 ± 430 nm با زمان نوردهی^۳ ۱/30، ISO5000 و قدرت تفکیک^۴ ۶۰۰۰ در ۴۰۰۰ پیکسل بهره گرفته شده است. برای طیف‌نگاری از یک طیف‌سنج نوری V900 با دقت گسسته‌سازی ۰٫۲۵ نانومتر و زمان نوردهی ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه استفاده شده است. خطای این وسیله در یافتن شدت تابش رادیکال‌هایی همچون CH* و OH* کمتر از ۵٪ ارزیابی شده است [۱۸].

در شعله‌های جریان متقابل دو متغیر نرخ کرنش^۵ جریان و نسبت هم‌ارزی، نقش مهمی در تشکیل شعله، محل قرارگیری، سطح و ضخامت شعله ایفا می‌کنند. نرخ کرنش شعله جریان متقابل مطابق معادله ۲ است [۱۹] که در آن L فاصله دو نازل، V_t سرعت جریان بالا، V_b سرعت جریان پایین، ρ_t و ρ_b چگالی متناظر با هریک است.

¹ Non-Premixed (Diffusion)

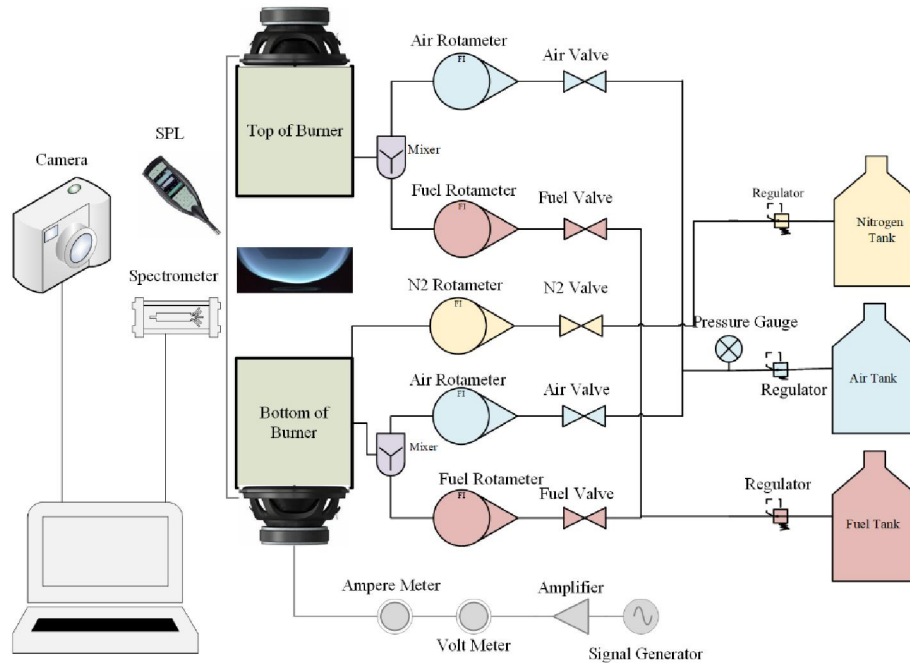
² Chemiluminescence

³ Exposure Time

⁴ Resolution

⁵ Strain Rate

$$SR = \frac{2V_t}{L} \left(1 + \frac{V_b}{V_t} \sqrt{\frac{\rho_b}{\rho_t}} \right) \quad (2)$$



شکل ۱ طرح آزمونگر تجربی تحریک آکوستیکی شعله جریان متقابل

فاصله دو نازل در تمامی آزمون‌ها ثابت و برابر ۲,۰ سانتیمتر قرار داده شده است. شار حجمی سیال هوا و سوخت به ترتیب به کمک شارسنج‌های گازی Dwyer RMB و NIPON FLOWCELL SPO4 که هر یک به ترتیب خطای کمتر از ۳,۵ و ۵ درصد در مرحله تنظیم از خود نشان دادند، اندازه‌گیری شده است. چگالی گازها به کمک اندازه‌گیری فشار و دما و با فرض گاز آرمانی و سرعت میانگین خروجی نازل به کمک شار حجمی گازها محاسبه شده است. بدین ترتیب، با به‌کارگیری معادله ۲ در هر سه شعله نرخ کرنش تقریباً ثابت نگه داشته شده است تا تغییری بر ساختار شعله نداشته باشد. نسبت هم‌ارزی عبارت است از نسبت سوخت به هوای جریان به نسبت سوخت به هوای استوکیومتری. نسبت هم‌ارزی بیش از مقدار یک، نشانگر جریان غنی از سوخت و نسبت هم‌ارزی کمتر از یک، نشانگر جریان رقیق از سوخت است. جدول ۱ شار هوا-متان سه شعله با روش اختلاط متفاوت را نمایش می‌دهد. به‌منظور 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 شار ثابت ۲۰ L/min استفاده شده است.

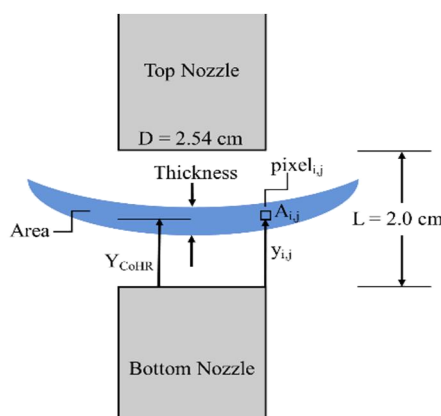
جدول ۱ مشخصات شعله‌های آزمون تحریک شعله جریان متقابل

$\dot{Q}_{a,top}$ (L/min)	$\dot{Q}_{f,top}$ (L/min)	ϕ_{top}	$\dot{Q}_{a,bottom}$ (L/min)	$\dot{Q}_{f,bottom}$ (L/min)	ϕ_{bottom}	SR (1/s)
۱۵	۲,۵	۱,۴۴	۱۵	۲,۵	۱,۴۴	۱۴۴
۱۵	۰,۶۶	۰,۶	۱۵	۴,۱۶	۲,۴	۱۴۶
۱۵	۰	-	۱۵	۴,۱۶	۲,۴	۱۴۰

شکل ۲ دستگاه مختصات و کمیت‌های هندسی شعله را معرفی کرده است. ضخامت میانگین شعله، حدفاصل بالاترین تا پایین‌ترین پیکسل تصویر فیلتر شده در خط تقارن محوری شعله، در نظر گرفته شده است. سطح میانگین شعله، از شمارش تعداد پیکسل روشن و ضرب آن در مقیاس طولی و عرضی پیکسل‌ها مشخص می‌شود. برای اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی شعله، از آنجا که لبه‌های شعله دائم در حال تغییر شکل است، مرکز سطح تابش میانگین، روی محور تقارن شعله با معادله ۳ معرفی می‌شود.

$$Y_{CoHR} = \frac{\sum y_i I_i}{\sum I_i} \quad (3)$$

که در آن y_i فاصله محوری پیکسل از مرکز نازل پایین و I_i شدت تابش آن پیکسل در طول موج ۴۳۰ nm است. تمام فرایند ذکر شده در بستر یک برنامه پردازش تصویر در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی و اجرا شده است.



شکل ۲ تعریف هندسی متغیرهای شعله جریان متقابل

۳- نتایج و بحث

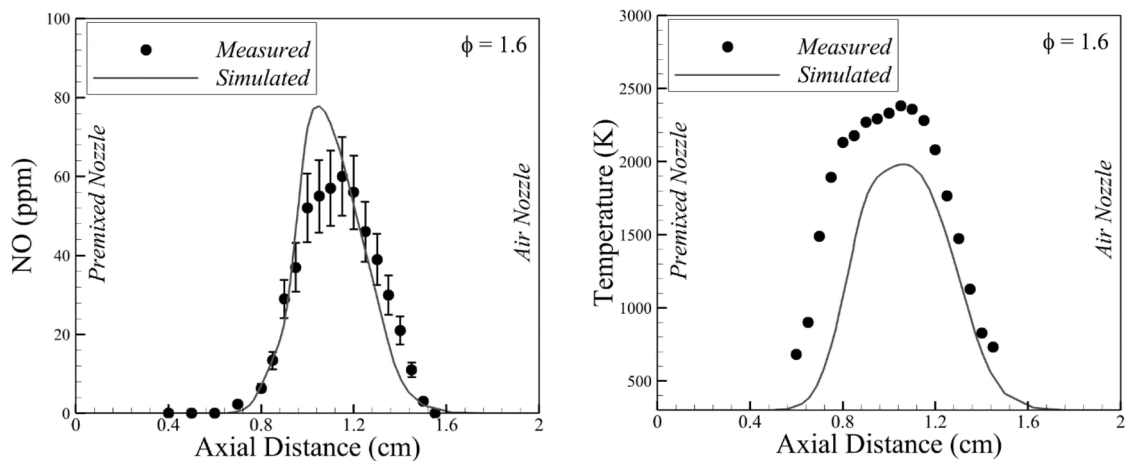
به منظور شناسایی تفاوت‌های ساختار سه شعله پیش‌آمیخته، پیش‌آمیخته جزئی و غیرپیش‌آمیخته جدول ۱، در این بخش از دو روش عددی و تجربی استفاده شده است. محل تشکیل نقطه سکون و ناحیه پایداری جبهه شعله که از طریق ناحیه تشکیل رادیکال CH^* شناسایی می‌شود، تأثیر مهمی در برهمکنش میدان واکنش شیمیایی و امواج آکوستیک دارد. سپس اثرات اختلاط بر طیف تابش کلی شعله‌ها بررسی شده است و اثرات اختلاط در خاموشی آکوستیک شعله مطالعه شده است. در بخش نهایی نورتابی شیمیایی رادیکال CH^* شعله در روش پیش‌آمیخته جزئی تحت اثر تغییرات دامنه و بسامد امواج بررسی شده است تا اثرات این دو متغیر بر روی ساختار دینامیکی شعله مشخص شود.

۳-۱- ساختار پایای شعله جریان متقابل

به کمک شبیه‌سازی یک‌بعدی پایای شعله جریان متقابل با استفاده از نرم‌افزار CHEMKIN [۲۰] و سازوکار واکنشی GRI3.0 [۲۱]، محل نقطه سکون، ناحیه آزادسازی حرارت، ناحیه تشکیل رادیکال CH^* ، توزیع دما و گونه‌های شیمیایی فرآورده برای هر سه شعله محاسبه شده است. برای صحت‌سنجی نتایج عددی، از نتایج تجربی مرجع که با روش فلورسانس القایی با لیزر^۱، LIF، استخراج شده، استفاده شده است [۲۲]. بدین منظور، از یک شعله پیش‌آمیخته جزئی متان-هوا بهره گرفته شده است. شرایط مرزی حل در بخش جریان واکنشی پیش‌آمیخته، نسبت هم‌ارزی $\phi = 1.6$ و در جریان دیگر اکسند هوا وارد میدان حل شده، به گونه‌ای که نرخ کرنش کلی جریان $1/s$ ۲۰ باشد.

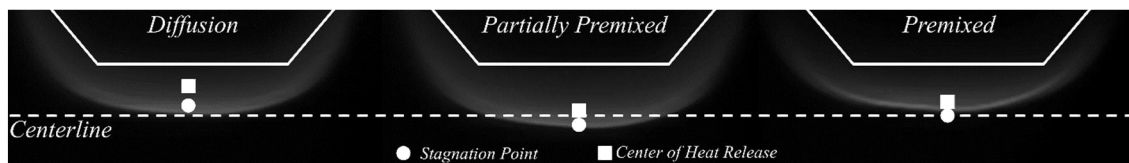
¹ Laser-Induced Fluorescence

دمای تمامی واکنش‌دهنده‌ها برابر ۳۰۰ کلوین و فاصله بین دو نازل، همانند آزمون‌های این پژوهش، ثابت و برابر ۲،۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج حل عددی و تجربی برای غلظت NO و دمای شعله در شکل ۳ مشاهده می‌شود. خطوط توپر شبیه‌سازی عددی و دایره‌های توپر داده‌های تجربی را مشخص کرده است. مطابقت مناسبی در ضخامت ناحیه تغییر دما و غلظت NO، به خصوص در بخش پیش‌گرمایش ناحیه غیرپیش‌آمیخته مشاهده می‌شود. اختلاف دمای ۳۰۰ K بین بیشینه دمای آزمون تجربی و شبیه‌سازی به علت محدودیت روش LIF در ناحیه دما بالا بازمی‌گردد. 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 تحلیل پژوهش کارآمد تلقی می‌شود [۲۳].



شکل ۳ مقایسه دما و غلظت NO به روش LIF [۲۲] با شبیه‌سازی شعله پیش‌آمیخته جزئی متان-هوا (نسبت هم‌ارزی ۱٫۶ و نرخ کرنش کلی ۲۰ 1/s)

نورتابی شیمیایی سه شعله جریان متقابل ذکر شده در جدول ۱، به کمک ۵۰۰ میلی‌ثانیه تصویربرداری از شعله پایا و با استفاده از صافی نوری میان‌گذر 430 ± 10 نانومتر بررسی شده است. شکل ۴ نورتابی شیمیایی سه شعله را به همراه نمایش مرکز سطح تابش (نماد "□") و نقطه سکون (نماد "○") نمایش می‌دهد. شعله جریان متقابل پیش‌آمیخته جزئی، پایین‌ترین نقطه سکون و مرکز سطح تابش را نسبت به دو شعله دیگر دارد؛ زیرا در این روش، پایین‌تر از نقطه سکون، یک جبهه غنی از سوخت شعله ناشی از جریان پیش‌آمیخته جریان پایین تشکیل می‌شود.



شکل ۴ نورتابی شیمیایی رادیکال CH* شعله پایای جریان متقابل در سه روش اختلاط مختلف؛ "□" نشانگر مرکز سطح تابش و "○" نشان‌دهنده نقطه سکون

هیدروکربن‌های باقیمانده و گونه‌های شیمیایی فعال این ناحیه واکنشی، به سمت نازل فوقانی حرکت می‌کند و با هوای اضافه یک جبهه شعله نفوذی شکل می‌دهد. در مورد شعله پیش‌آمیخته انتظار می‌رود شعله کاملاً متقارن شکل بگیرد (شکل ۵ مشاهده شود)؛ اما جریان هم‌محور نیتروژن و اثرات نیروی شناوری محصولات داغ احتراق سبب می‌شود شعله اندکی به سمت بالای خط تقارن منحرف شود. دو لایه بسیار نازک شعله در این روش اختلاط قابل شناسایی است که ناشی از دو جریان پیش‌آمیخته نازل بالا و پایین است.

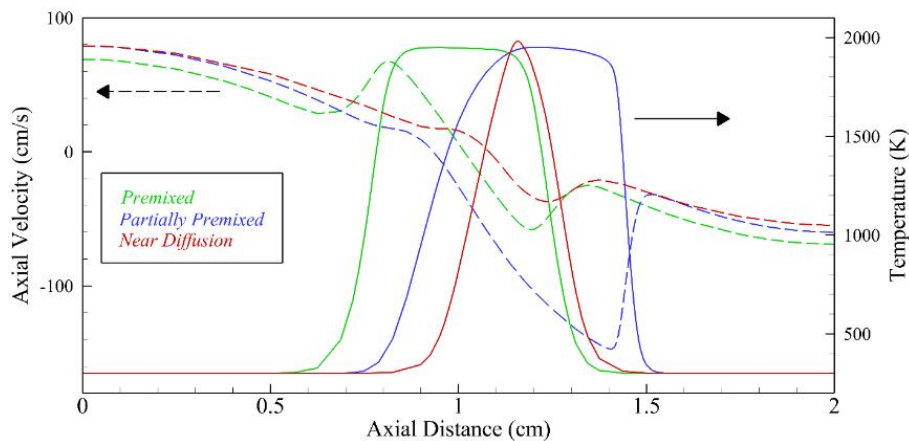
کمترین ضخامت شعله (بر حسب توزیع دمای شکل ۵) و بالاترین مرکز سطح تابش متعلق به شعله نفوذی یا غیرپیش‌آمیخته است. در این روش اختلاط، به دلیل وجود زمان اختلاط سوخت و هوا، زمان کمتری برای واکنش شیمیایی و پایداری شعله باقی می‌ماند و این تفاوت‌ها در خاموشی آکوستیک شعله نقش مهمی ایفا خواهد کرد. نتایج کمی محاسبه سطح، ضخامت و مرکز سطح تابش شعله با به‌کارگیری کد پردازش تصویر توضیح داده شده در بخش پیش، از روی تصاویر شعله استخراج شده و در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲ خلاصه نتایج تجربی نورتابی شیمیایی رادیکال CH* با به‌کارگیری کد پردازش تصویر

(1/s) SR	(cm ²) Area	(mm) thickness	(cm) Y _{COHR}	Regime
۱۴۴	۲,۱۲	۴,۶	۱,۳۷	Premixed
۱۴۶	۲,۲	۵,۵	۱,۵۳	Partially Premixed
۱۴۰	۲,۰۴	۳,۹	۱,۹	Near Diffusion

Y_{COHR} محل مرکز سطح تابش CH* شعله پایا محاسبه شده از مرکز نازل پایین

شکل ۵ اثرات اختلاط بر توزیع سرعت محوری واکنش‌دهنده‌ها و توزیع دما در راستای محور نازل را برای هر سه شعله آزمون نشان می‌دهد. بر خلاف روش اختلاط نفوذی یا غیرپیش‌آمیخته (رنگ قرمز)، دو شعله پیش‌آمیخته (سبز) و پیش‌آمیخته جزئی (آبی) به دلیل وجود دو جبهه شعله، ضخامت نسبتاً زیادی دارند. جدول ۳ نتایج شبیه‌سازی عددی برای محل تشکیل نقطه سکون، بیشینه دما، چگالی فرآورده و کسر مولی عمده فرآورده‌های سه شعله را با یکدیگر مقایسه کرده است. توزیع دمای شعله پیش‌آمیخته در راستای محوری نشان می‌دهد که دو جبهه شعله مشابه در دو سمت نقطه سکون (Y_{stagnation} = 1.0 cm) شکل گرفته است و توزیع سرعت محوری نیز تقارن دارند.



شکل ۵ شبیه‌سازی سرعت محوری و دما در راستای محور برای هر سه شعله در حالت پایا. خط توپر نشانگر دما و خط چین نشانگر سرعت محوری است

جدول ۳ موقعیت نقطه سکون، بیشینه دما، چگالی فرآورده و ترکیب فرآورده‌های شعله جریان متقابل

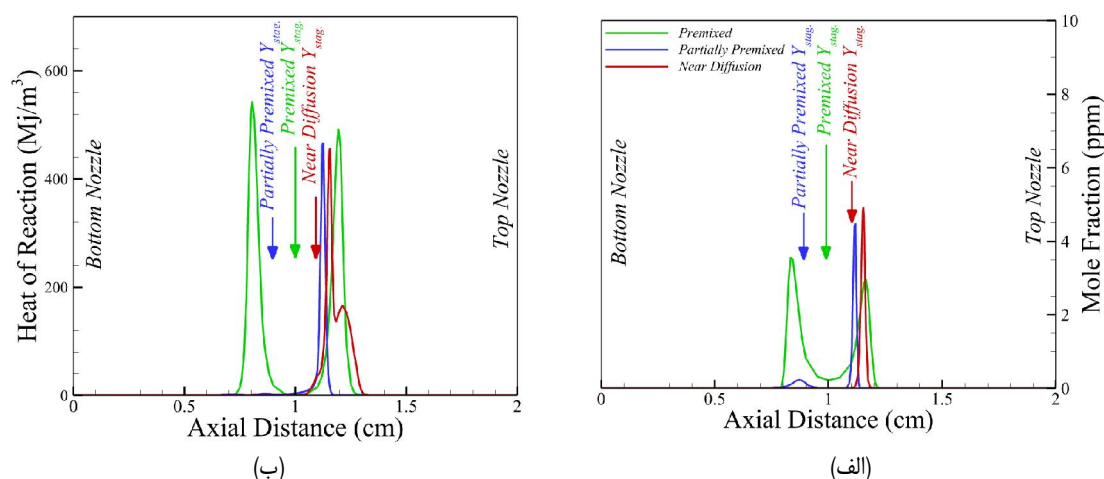
Mixing Regime	Y _{stagnation} (cm)	T (K)	$\rho_P \left(\frac{g}{cm^3} \right)$	H ₂ O*	H ₂ *	CO*	CO ₂ *
Premixed	۱	۱۹۴۸	۰,۱۴۷	۰,۲۱	۰,۱۱	۰,۱۲	۰,۰۴۲
Partially Premixed	۰,۹	۱۹۵۲	۰,۱۶۵	۰,۱۷	۰,۰۴	۰,۰۵	۰,۰۵۸
Near Diffusion	۱,۱	۱۹۸۱	۰,۱۶۵	۰,۱۷	۰,۰۳	۰,۰۵	۰,۰۷۴

* بیشینه غلظت گونه برحسب کسر مولی

ساختار شبیه‌سازی شده در شعله پیش‌آمیخته با مرجع [۲۴] در تطابق است. در روش اختلاط پیش‌آمیخته جزئی دو ناحیه واکنشی متفاوت در دو سمت نقطه سکون ($Y_{stagnation} = 0.9 \text{ cm}$) تشکیل می‌شود. بیشترین ضخامت شعله و سطح شعله در جدول ۲ با توجه به نتایج شکل ۵ متعلق به شعله پیش‌آمیخته جزئی است. یک جبهه شعله پیش‌آمیخته پایین‌تر از نقطه سکون شکل می‌گیرد و باقیمانده هیدروکربن‌های نسوخته در سمت دیگر نقطه سکون با هوای اضافی یک جبهه شعله غیرپیش‌آمیخته را شکل می‌دهند. این ساختار شعله با ساختار شعله جریان متقابل مرجع [۲۵] مطابقت دارد.

در روش اختلاط نفوذی یا غیرپیش‌آمیخته، یک جبهه شعله نازک بین نقطه سکون ($Y_{stagnation} = 1.1 \text{ cm}$) و نازل پایینی شکل می‌گیرد. نتایج تجربی جدول ۲ و نتایج شبیه‌سازی شکل ۵ نشان می‌دهد که کمترین ضخامت و سطح شعله متعلق به روش اختلاط نفوذی است. ساختار شعله نفوذی به طور گسترده در مراجعی همچون [۲۶] بررسی شده است. بیشینه دمای شعله برابر ۱۹۸۱ کلوین است که به شعله نفوذی تعلق دارد؛ زیرا محصولاتی همچون H_2O و H_2 در فرآورده شعله نفوذی کمتر حضور دارد و سبب افزایش دمای این شعله نسبت به دو شعله دیگر می‌شود. کمترین دمای شعله و چگالی فرآورده به شعله پیش‌آمیخته تعلق دارد؛ زیرا بیشترین مقدار H_2O ، CO_2 و H_2 را دارد. دمای شعله پیش‌آمیخته جزئی بین دو شعله دیگر و برابر ۱۹۵۲ کلوین است.

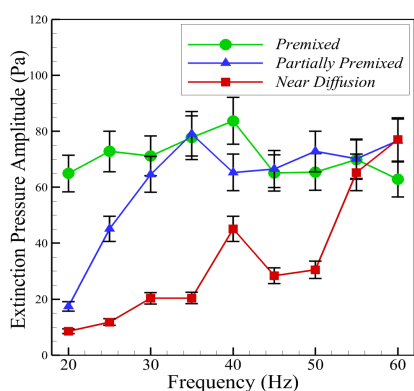
شکل ۶ توزیع حرارت واکنش و غلظت مولی رادیکال CH^* را برای هر سه شعله جدول ۱ نمایش می‌دهد. مقایسه دو نمودار نشان می‌دهد که بین غلظت مولی رادیکال CH^* و نرخ آزادسازی حرارت شعله یک همبستگی وجود دارد [۲۷]. همان گونه که پیش‌تر نیز ذکر شد، شعله پیش‌آمیخته و پیش‌آمیخته جزئی ساختاری گسترده (دو جبهه‌ای) دارد و در مقابل شعله نفوذی ساختاری نازک و فشرده دارد. در شعله پیش‌آمیخته (سبز رنگ) نقش دو جبهه در تولید حرارت و تشکیل رادیکال CH^* تقریباً برابر است. اما در روش پیش‌آمیخته جزئی (آبی رنگ) در جبهه پیش‌آمیخته اولیه تشکیل رادیکال CH^* با نرخ کمی آغاز می‌شود و سپس در ناحیه جبهه نفوذی ثانویه یک افزایش ناگهانی در تشکیل رادیکال CH^* رخ می‌دهد. به نظر می‌رسد در این نوع شعله نقش جبهه نفوذی در آزادسازی حرارت واکنش بیش از جبهه اولیه پیش‌آمیخته است. شعله نفوذی (قرمز رنگ) لایه آزادسازی حرارتی به ضخامت حدوداً ۳ میلی‌متر و بیشینه غلظت رادیکال CH^* را دارد. در این شعله، فاصله نقطه سکون و محل تجمع رادیکال CH^* نسبت به دو شعله دیگر، کمینه است. اما در شعله پیش‌آمیخته جزئی فاصله بین نقطه سکون و محل تشکیل رادیکال CH^* بیشینه است.



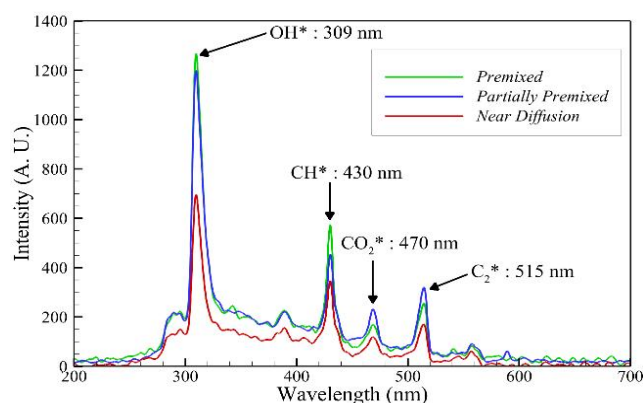
شکل ۶ الف) حرارت واکنش و ب) غلظت مولی رادیکال CH^* برای روش‌های مختلف اختلاط شعله جریان متقابل (فلش‌های محل نقطه سکون را نمایش می‌دهد)

۳-۲- خاموشی آکوستیک

برای استخراج دامنه فشار آکوستیک خاموشی شعله، در هر بسامد ثابت دامنه امواج به حدی افزایش داده شده است تا جایی که خاموشی کلی رخ بدهد. به دلیل احتمال آسیب دیدن محرک آکوستیک در بسامدهای بیش‌تر از ۶۰ هرتز در اثر عبور جریان برقی قوی (توان ورودی بیش از ۴۰۰ وات)، بسامدهای بیش‌تر صرف‌نظر شده است. شکل ۷ طیف تابش سه شعله آزمون در حالت پایا (بدون تحریک آکوستیک) را نمایش می‌دهد. بیشترین شدت تابش در طول موج ۳۰۹ نانومتر (رادیکال OH^*) متعلق به شعله پیش‌آمیخته و کمترین مقدار متعلق به شعله نفوذی (غیرپیش‌آمیخته) است. شدت تابش در طول موج ۴۳۰ نانومتر (رادیکال CH^*) همین رفتار را دارد. همانطور که پیش‌تر نیز ذکر شد شدت تابش این دو گونه با نرخ آزادسازی حرارت ارتباط مستقیم دارد. در نتیجه نرخ آزادسازی حرارت شعله با افزایش مقدار اختلاط سوخت با هوا افزایش می‌یابد. نتایج آزمون خاموشی آکوستیک سه شعله جدول ۱ (در روش اختلاط غیرپیش‌آمیخته، پیش‌آمیخته جزئی و پیش‌آمیخته) در محدوده بسامدی ۲۰-۶۰ هرتز در شکل ۷ ترسیم شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۷ الف) طیف تابش شعله جریان متقابل پایا و ب) دامنه امواج آکوستیک خاموشی سه شعله آزمون

در بسامدهای پایین (۲۰ هرتز) که مقیاس زمانی اثرگذاری امواج آکوستیک بر روی شعله زیاد است، از شعله غیرپیش‌آمیخته به سمت شعله پیش‌آمیخته، هرچه اختلاط سوخت و هوا کامل‌تر شود، دامنه امواج آکوستیک لازم برای خاموشی شعله افزایش می‌یابد؛ در شعله‌های غیرپیش‌آمیخته مقیاس زمانی اختلاط بر واکنش شیمیایی تقدم دارد و در نتیجه زیرواکنش‌های تجزیه متان فرصت کافی برای حضور در ناحیه دما داغ شعله را نخواهند داشت؛ لذا نسبت به دو شعله دیگر در دامنه‌های تحریک ضعیف‌تر خاموش خواهد شد.

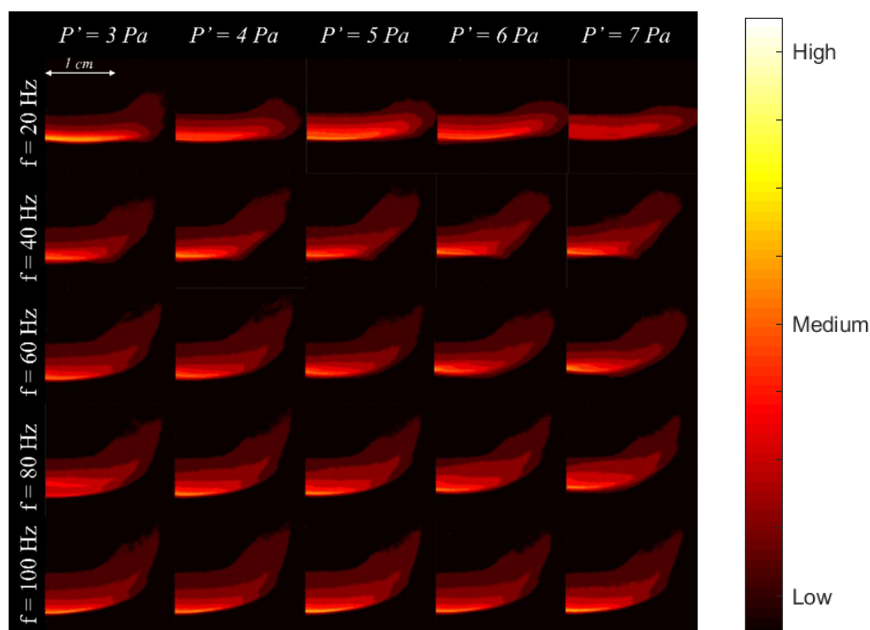
دو شعله پیش‌آمیخته و پیش‌آمیخته جزئی، در بسامدهای کمتر از ۳۰ هرتز، در دامنه آکوستیک متفاوتی خاموش می‌شوند. اما بعد از کاهش مقیاس زمانی امواج آکوستیک به مقدار کمتر از ۳۳,۳ میلی‌ثانیه، دامنه امواج آکوستیکی لازم برای خاموشی هر دو روش اختلاطی تقریباً یکسان است. علت این امر این است که یک مقیاس زمانی اختلاط در شعله پیش‌آمیخته جزئی وجود دارد که سبب کاهش پایداری این نوع شعله نسبت به شعله پیش‌آمیخته می‌شود. وجود تأخیر زمانی اختلاط در فرایند پایداری شعله پیش‌آمیخته جزئی سبب می‌شود که در مواجهه با امواج دارای مقیاس زمانی بین ۵۰ الی ۳۳,۳ میلی‌ثانیه (محدوده بسامدی ۲۰ الی ۳۰ هرتز)، نسبت به روش پیش‌آمیخته تضعیف رخ بدهد. بازه تضعیف پایداری در روش غیرپیش‌آمیخته که مقیاس زمانی اختلاط بیشتری نسبت به هر دو شعله دارد، به گستره ۱۸,۲ الی ۵۰ میلی‌ثانیه افزایش می‌یابد. در بسامدهای نسبتاً بالاتر (۶۰ هرتز)، دامنه امواج خاموشی آکوستیکی سه شعله به یکدیگر نزدیک‌تر است. در این ناحیه، مقیاس زمانی تأثیرگذاری امواج آکوستیکی نسبت به مقیاس زمانی اختلاط و واکنش شیمیایی در حدی کاهش یافته است که دیگر امواج آکوستیکی

برهمکنش چندانی با این دو پدیده ندارد. همچنین مشاهده شد که دامنه امواج آکوستیکی لازم برای خاموشی شعله غیرپیش‌آمیخته و پیش‌آمیخته جزئی با بسامد افزایش دارند؛ اما شعله پیش‌آمیخته نسبت به تغییرات بسامد حساسیت کمتری از خود نشان داده است. این حساسیت تأثیر مقیاس زمانی اختلاط سوخت و هوا را مشهود می‌کند.

۳-۳ ساختار شعله جریان متقابل در مواجهه با امواج آکوستیک

به منظور بررسی رفتار دینامیکی شعله جریان متقابل پیش‌آمیخته جزئی تحریک شده (شعله ۲ در جدول ۱)، میانگین ms ۱۰۰۰ طیف‌سنجی نوری و نورتابی شیمیایی رادیکال CH* در پنج بسامد ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ هرتز و در پنج دامنه فشار آکوستیکی ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ پاسکال آزمایش شده است. شکل ۸ نتایج تحریک شعله مذکور را در زمان نوردی ثابت یک سی‌ام ثانیه نمایش می‌دهد. در بسامدهای پایین (۲۰ هرتز) ضخامت، سطح و نرخ آزادسازی حرارت میانگین شعله تحریک شده با افزایش دامنه امواج آکوستیکی کاهش می‌یابد؛ اما با افزایش بسامد امواج تحریک (۱۰۰ هرتز)، اثر تغییرات دامنه فشار روی ضخامت میانگین شعله تحریک شده ناچیز است؛ زیرا مقیاس زمانی اثرگذاری موج آکوستیک در مقایسه با نرخ واکنش شیمیایی و مقیاس زمانی اختلاط کوچک می‌شود و نمی‌تواند بر واکنش شیمیایی اثرگذار باشد. در بسامدهای پایین سطح و ضخامت شعله تحریک شده از شعله حالت پایا کمتر است و با افزایش بسامد تحریک این دو متغیر از شعله پایا بیشتر خواهند شد. علت این پدیده می‌تواند افزایش نرخ اختلاط بر اثر نوسانات آکوستیکی میدان جریان باشد. ضخامت شعله جریان متقابل طبق معادله (۴) به ضریب نفوذ واکنش‌دهنده‌ها ارتباط پیدا می‌کند که در آن D ضریب نفوذ و δ ضخامت شعله است [۲۸].

$$\delta = \frac{D}{SR} \quad (4)$$



شکل ۸ نورتابی شیمیایی رادیکال CH* شعله جریان متقابل پیش‌آمیخته جزئی

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر نحوه اختلاط سوخت و هوا بر ساختار شعله جریان متقابل پایا به روش عددی و تجربی و پایداری آکوستیکی شعله جریان متقابل آرام به روش تجربی بررسی شده است. محل تشکیل نقطه سکون، سطح شعله، ضخامت شعله و مرکز سطح تابش شعله تحت اثر نحوه اختلاط تغییر می‌کند. نتایج تحریک آکوستیکی سه شعله با نرخ کرنش و نسبت هم‌ارزی

مشابه، اما با سه روش اختلاط مختلف پیش‌آمیخته، پیش‌آمیخته جزئی و غیرپیش‌آمیخته نشان داد که در بسامدهای پایین (۲۰ هرتز) شعله غیرپیش‌آمیخته به دلیل حضور مقیاس زمانی اختلاط، پایداری کمتری نسبت به دو شعله دیگر دارد و در دامنه فشار آکوستیک پایین‌تری خاموش می‌شود. در بسامدهای بالاتر (۶۰ هرتز) مقیاس زمانی اثرگذاری امواج آکوستیک بر روی هر سه شعله به اندازه‌ای کاهش می‌یابد که دیگر پدیده اختلاط اثری بر خاموشی آکوستیکی ندارد و هر سه شعله رفتار تقریباً یکسانی از خود نشان می‌دهند. اثرات اختلاط در بسامدهای کمتر از ۵۵ هرتز مشهود است و در نتیجه مقیاس زمان اختلاط سوخت با هوا بیشتر از ۱۸٫۲ میلی‌ثانیه است. بررسی نورتایی شیمیایی رادیکال CH^* شعله جریان متقابل پیش‌آمیخته جزئی نشان داد در بسامد پایین شعله تحریک شده نسبت به شعله پایا و بدون تحریک، ضخامت، سطح و نرخ آزادسازی حرارت میانگین کمتری دارد. با افزایش بسامد ضخامت، سطح و نرخ آزادسازی میانگین شعله از شعله پایا بیشتر می‌شود؛ اما افزایش دامنه امواج آکوستیک در بسامدهای بالا تأثیر محسوسی بر ساختار شعله نداشت.

فهرست علائم

I	شدت تابش پیکسل
L	فاصله محوری نازل، m
p	فشار، Pa
\dot{Q}	شار حجمی، L/min
SPL	شدت صوت، dB
SR	نرخ کرنش، 1/s
V	سرعت، m/s
y	فاصله محوری از نازل پایین، cm
Y_{CoHR}	فاصله مرکز سطح تابش از نازل پایین، cm

علائم یونانی

ρ	چگالی، kg/m^3
φ	نسبت هم‌ارزی
D	ضریب نفوذ، m/s
δ	ضخامت شعله نفوذی، m

زیرنویس‌ها

a	هوا
b	نازل پایین
$CoHR$	مرکز سطح تابش
f	سوخت
ref	مرجع
$Stagnation$	نقطه سکون
t	نازل بالا
p	محصولات

بالانویس‌ها

,	کمیت آکوستیکی
---	---------------

References

- [1] Zong R, Kang R, Liu C, Zhang Z, Zhi Y. Analysis of flame extinguishment and height in low frequency acoustically excited methane jet diffusion flame. *Microgravity Science and Technology*. 2018 May;30:237-42. doi: [10.1007/s12217-017-9590-5](https://doi.org/10.1007/s12217-017-9590-5)
- [2] Lieuwen TC, Yang V, editors. *Combustion instabilities in gas turbine engines: operational experience, fundamental mechanisms, and modeling*. American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2005 Sep 30. doi: [10.2514/4.866807](https://doi.org/10.2514/4.866807)
- [3] Wandel AP. Identification of local extinction and prediction of reignition in a spark-ignited sparse spray flame using data mining. *Combustion and Flame*. 2018 Dec 1;198:342-55. doi: [10.1016/j.combustflame.2018.09.028](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.09.028)
- [4] Fansler TD, Reuss DL, Sick V, Dahms RN. Invited Review: Combustion instability in spray-guided stratified-charge engines: A review. *International Journal of Engine Research*. 2015 Apr;16(3):260-305. doi: [10.1177/1468087414565675](https://doi.org/10.1177/1468087414565675)
- [5] Klos D, Kokjohn SL. Investigation of the sources of combustion instability in low-temperature combustion engines using response surface models. *International Journal of Engine Research*. 2015 Apr;16(3):419-40. doi: [10.1177/1468087414556135](https://doi.org/10.1177/1468087414556135)
- [6] Wagner RM, Drallmeier JA, Daw CS. Characterization of lean combustion instability in premixed charge spark ignition engines. *International Journal of Engine Research*. 2000 Aug 1;1(4):301-20. doi: [10.1243/1468087001545209](https://doi.org/10.1243/1468087001545209)
- [7] Kimura K, Mori S, Kawauchi M, Shimizu R. An investigation for reducing combustion instability under cold-start condition of a direct injection gasoline engine. *International Journal of Engine Research*. 2019 Apr;20(4):470-9. doi: [10.1177/1468087418766924](https://doi.org/10.1177/1468087418766924)
- [8] Akhtardanesh MA, Khadem Alrezaeian M, Hosseinkhani MJ, Farshchi M. An experimental study on Bunsen flame acoustic extinction," in *The 21st International Conference of Iranian Aerospace Association, Tehran, 2022*. [In Persian]
- [9] Birbaud AL, Durox D, Ducruix S, Candel S. Dynamics of confined premixed flames submitted to upstream acoustic modulations. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2007 Jan 1;31(1):1257-65. doi: [10.1016/j.proci.2006.07.122](https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.122)
- [10] Takita K, Yamazaki H, Uchida T, Masuya G. Extinction Karlovitz numbers of premixed counterflow flames under various pressures. *Combustion science and technology*. 2006 Sep 1;178(9):1649-68. doi: [10.1080/00102200600582384](https://doi.org/10.1080/00102200600582384)
- [11] Chung SH, Chung DH, Fu C, Cho P. Local extinction Karlovitz number for premixed flames. *Combustion and flame*. 1996 Sep 1;106(4):515-20. doi: [10.1016/0010-2180\(96\)00109-5](https://doi.org/10.1016/0010-2180(96)00109-5)
- [12] Vu TM, Cha MS, Lee BJ, Chung SH. Tip opening of premixed bunsen flames: Extinction with negative stretch and local Karlovitz number. *Combustion and Flame*. 2015 Apr 1;162(4):1614-21. doi: [10.1016/j.combustflame.2014.11.022](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.11.022)
- [13] Niegodajew P, Łukasiak K, Radomiak H, Musiał D, Zajemska M, Poskart A, Gruszka K. Application of acoustic oscillations in quenching of gas burner flame. *Combustion and Flame*. 2018 Aug 1;194:245-9. doi: [10.1016/j.combustflame.2018.05.007](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.05.007)
- [14] Alipour E, Akhtardanesh MA, Malaek SM. Application of Machine Learning to Bring Efficiency to Costly Experiments ; Case of Flame-Extinction. in *Fuel and Combustion (20)*, Tehran: Iranian Society of Fuel and Combustion, 2024.
- [15] Hirschberg A, Rienstra SW. An introduction to aeroacoustics. *Eindhoven university of technology*. 2004 Jul 18;31.
- [16] Price RB, Hurler IR, Sugden TM. Optical studies of the generation of noise in turbulent flames. In *Symposium (international) on combustion 1969 Jan 1 (Vol. 12, No. 1, pp. 1093-1102)*. Elsevier. doi: [10.1016/S0082-0784\(69\)80487-X](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(69)80487-X)
- [17] Guyot D, Guethé F, Schuermans B, Lacarelle A, Paschereit CO. CH*/OH* chemiluminescence response of an atmospheric premixed flame under varying operating conditions. In *Turbo expo: Power for land, sea, and air 2010 Oct 10 (Vol. 43970, pp. 933-944)*. doi: [10.1115/GT2010-23135](https://doi.org/10.1115/GT2010-23135)
- [18] Akhtardanesh, MA, Khadem Alrezaeian M, Farshchi M. Interaction of acoustic waves with a laminar counterflow flame. in *9th National Conference of Acoustical Society of Iran, Tehran: Acoustical Society of Iran, 2023*. [In Persian]
- [19] Brown T, Pitz R. Experimental investigation of counterflow diffusion flames with oscillatory stretch. In *34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 1996 Jan (p. 214)*. doi: [10.2514/6.1996-214](https://doi.org/10.2514/6.1996-214)

- [20] Kee RJ. A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics. SANDIA REPORT, SAND89-8009B, UC-706. 1993.
- [21] Frenklach M, Wang H, Goldenberg M, Smith GP, Golden DM. Gri-mech: An optimized detailed chemical reaction mechanism for methane combustion. topical report, september 1992-august 1995. SRI International, Menlo Park, CA (United States); 1995 Nov 1.
- [22] Ravikrishna RV, Laurendeau NM. Laser-induced fluorescence measurements and modeling of nitric oxide in counterflow partially premixed flames. *Combustion and flame*. 2000 Sep 1;122(4):474-82. doi: [10.1016/S0010-2180\(00\)00136-X](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(00)00136-X)
- [23] Akhtardanesh MA, Hosseinkhani MJ, Farshchi M. The Effects of Hydrogen Addition on the Acoustic Response of a Methane-Air Partially Premixed Counterflow Flame. in *Fuel and Combustion* (20), Tehran: Iranian Society of Fuel and Combustion, 2024. [in Persian]
- [24] Saitoh T, Otsuka Y. Unsteady behavior of diffusion flames and premixed flames for counter flow geometry. *Combustion Science and Technology*. 1976 Apr 1;12(4-6):135-46. doi: [10.1080/00102207608946713](https://doi.org/10.1080/00102207608946713)
- [25] Naha S, Aggarwal SK. Fuel effects on NOx emissions in partially premixed flames. *Combustion and flame*. 2004 Oct 1;139(1-2):90-105. doi: [10.1016/j.combustflame.2004.07.006](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2004.07.006)
- [26] Ravikrishna RV, Sahu AB. Advances in understanding combustion phenomena using non-premixed and partially premixed counterflow flames: A review. *International Journal of Spray and Combustion Dynamics*. 2018 Mar;10(1):38-71. doi: [10.1177/1756827717738168](https://doi.org/10.1177/1756827717738168)
- [27] Nori V, Seitzman J. Evaluation of chemiluminescence as a combustion diagnostic under varying operating conditions. In 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 2008 Jan (p. 953). doi: [10.2514/6.2008-953](https://doi.org/10.2514/6.2008-953)
- [28] Sung CJ, Law CK. Dominant chemistry and physical factors affecting NO formation and control in oxy-fuel burning. In *Symposium (International) on Combustion* 1998 Jan 1 (Vol. 27, No. 1, pp. 1411-1418). Elsevier. doi: [10.1016/S0082-0784\(98\)80547-X](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(98)80547-X)