Journal of Acoustical Engineering Society of Iran, Vol. 11, No. 2, 2024

(Research Article)
Interaction of acoustic waves with a laminar counterflow flame

M.A. Akhtardanesh, M. Khademorezaeian, M. Farshchi*

Aerospace Engineering Department, Sharif University of Technology

Revised: 2023/08/22, Accepted: 2024/02/18

Abstract

Acoustic waves can affect the heat release of a flame, also and any disturbance in the heat release of a flame will cause the production of pressure waves. If the acoustic field and heat release fluctuations are coupled, combustion instability will occur. Understanding the interaction of acoustic and the flame dynamics will lead to a better understanding of the factors affecting the phenomenon of combustion instability. In this paper, the interaction of acoustic waves with a counterflow flame has been investigated experimentally. The effects of changing the frequency and amplitude of acoustic waves on the structure of a simple flame have been investigated. It has been shown that by increasing the frequency of flame excitations, compared to the steady flame, the average flame thickness, area and heat release will increase, and the position of center of the heat release will be lower. The response function of a counterflow flame was calculated and shown that at low frequencies the magnitude of the response function tends to unity value. As the frequency increases, the value of the response function weakens. Increasing the amplitude of acoustic oscillations has little effect on the magnitude of the flame response and weakens the response at high frequencies.

Keywords: Combustion Instability, Acoustic, Wave-flame interaction, Flame Response Function.

pp. 55-65 (in persian)

* E-mail: farshchi@sharif.edu

[Downloaded from joasi.ir on 2026-01-29]

مقاله پژوهشی

مجله انجمن مهندسی صوتیات ایران

سال: ۱۴۰۲، دوره: ۱۱، شماره ۲، صفحات: ۵۵-۶۵

اندرکنش امواج صوتی با شعله جریان لایه‌ای متقابل

محمدعلی اختردانش، میثم خادم‌الرضاییان، محمد فرشچی*

دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۳

چکیده

امواج صوتی می‌تواند بر روی نرخ رهایش حرارت شعله تأثیر گذارند و به‌طور متقابل، هر اغتشاشی در نرخ رهایش حرارت شعله، سبب تولید امواج فشاری صوتی خواهد شد. در صورت تزویج[1] شدن میدان صوتی فشار و نوسانات نرخ رهایش حرارت، ناپایداری احتراق رخ خواهد داد. شناخت نحوه اندرکنش امواج صوتی و میدان احتراقی شعله، موجب درک بهتر عوامل اثرگذار بر پدیده ناپایداری احتراق است. در این پژوهش، اندرکنش امواج صوتی با شعله جریان متقابل آرام به روش تجربی بررسی شده‌است. اثرات تغییر بسامد و دامنه امواج صوتی بر ساختار یک شعله پیش‌آمیخته جزئی و آرام در بازه بسامدی ۲۰ تا ۳۵۰ هرتز بررسی شده‌است. با افزایش بسامد تحریک شعله در مقایسه با شعله پایای بدون تحریک، ضخامت میانگین شعله، سطح شعله و نرخ رهایش حرارت آن افزایش یافت و محل مرکز سطح میانگین شعله پایین‌تر بود. تابع پاسخ دینامیکی شعله پیش‌آمیخته جزئی جریان متقابل استخراج شد و نشان داده شده در بسامدهای کم‌تر از ۵۰ هرتز، اندازه تابع پاسخ به مقدار واحد میل کرد. با افزایش بسامد مقدار تابع پاسخ تضعیف شد. افزایش دامنه امواج صوتی در بسامدهای پایین بر روی اندازه پاسخ شعله تأثیر اندکی داشت و در بسامدهای بالا سبب تضعیف پاسخ شد.

کلیدواژه‌ها: ناپایداری احتراق، صوتی، گرماصوتی (ترموآکوستیک)، اندرکنش موج-شعله، تابع پاسخ شعله.

۱. مقدمه

هر شعله به‌عنوان یک سامانه دینامیکی، تابع تبدیل[2] دینامیکی مخصوص به خود دارد. شناخت ویژگی‌های این تابع پاسخ دینامیکی طراحان محفظه احتراق را کمک می‌کند تا محفظه احتراق پایدار طراحی کنند. تابع تبدیل شعله (۱) عبارت است از نسبت نوسانات نرخ رهایش حرارت[3] به نسبت نوسانات صوتی فشار یا سرعت ورودی [۱]. پاسخ دینامیکی شعله تابع f بسامد امواج تحریک و $|p'/\bar{p}|$ دامنه آن است:

$$FTF(f,|p'/\bar{p}|)=\frac{Q'/\bar{Q}}{p'/\bar{p}}, \qquad (۱)$$

که در آن Q' نوسانات نرخ رهایش حرارت شعله، $\bar{Q}$ نرخ تولید حرارت میانگین شعله، p' فشار موج صوتی و $\bar{p}$ فشار میانگین میدان جریان احتراق است. تابع پاسخ شعله، مانند سایر توابع تبدیل دینامیکی از یک فاز[4] و یک بهره[5] تشکیل شده‌است. فاز بیانگر اختلاف بین ورودی موج صوتی و خروجی حرارت است؛ بهره نیز بیانگر نسبت دامنه نوسانات نرخ رهایش حرارت به دامنه امواج صوتی است.

امروزه در صنعت موتورهای توربینی همه شعله‌ها در رژیم جریان آشفته[6] کار می‌کنند و اغلب از سازوکارهای پیچیده‌ای از قبیل

* نویسنده پاسخگو: farshchi@sharif.edu

[1] coupled
[2] Flame Transfer Function
[3] Heat Release
[4] Phase
[5] Gain
[6] Turbulent

[Downloaded from joasi.ir on 2026-01-29]

پیچش[7] برای پایداری شعله استفاده می‌کنند. راه شناخت رفتار دینامیکی شعله‌های صنعتی، درک دینامیک شعله‌های آرام[8] و بدون پیچیدگی است؛ زیرا هر شعله پیچیده و آشفته، متشکل از تعداد زیادی شعله آرام ساده و کوچک است [۲]. از این رو در این پژوهش نگاه عمیق‌تری به شعله آرام و ساده جریان متقابل[9] شده‌است.

در سال ۲۰۰۹ داروکس و همکاران [۳] با بررسی چهار نوع شعله مخروطی، V شکل، M شکل و آرایه‌ای از شعله‌های مخروطی نشان دادند که با افزایش دامنه امواج صوتی، فاز پاسخ هر چهار شعله تأثیر اندکی می‌پذیرد . اما دامنه پاسخ شعله با افزایش دامنه امواج صوتی تضعیف می‌شود. در سال ۲۰۱۰ نیز کندل و همکاران [۱] مطالعات خود را بر روی شعله پیچشی و آشفته انجام دادند و نشان دادند تابع پاسخ این شعله نیز با افزایش دامنه امواج صوتی تضعیف می‌شود؛ ولی اختلاف فاز آن چندان تغییر نمی‌کند؛ هرچند تابع پاسخ شعله پیچشی آشفته با شعله ساده‌ای همچون شعله مخروطی متفاوت است.

در سال ۲۰۱۳ شولر و همکاران [۴] با تغییر دامنه و بسامد امواج صوتی روی یک شعله مخروطی آرام دریافتند که در بسامدهای پایین فاز و بهره تابع پاسخ تأثیر چندانی از دامنه امواج صوتی نمی‌پذیرد. ولی در بسامدهای بالاتر فاز و بهره تابع پاسخ اشباع[10] می‌شود. در سال ۲۰۱۴ اوبرلیتنر و همکاران [۵] مطالعه مشابهی بر روی شعله پیچشی محصور به دیواره استوآن‌های انجام دادند و با اندازه‌گیری شدت تابش رادیکال OH^* دریافتند که اندازه تابع پاسخ با دامنه امواج صوتی رابطه عکس دارد. مطالعات آن‌ها نشان داد دامنه امواج صوتی نمی‌تواند بر روی فاز پاسخ دینامیکی شعله اثر بگذارد. در سال ۲۰۱۷ همین گروه [۶] مطالعه دیگری بر روی تأثیر جهت امواج صوتی بر روی پاسخ دینامیکی شعله پیچشی انجام دادند. آن‌ها با تولید امواج جانبی، پاسخ دینامیکی شعله را با حالت امواج طولی مقایسه کردند و دریافتند تأثیر جهت امواج بر روی فاز تابع پاسخ ناچیز و بر روی دامنه تابع پاسخ اثر تقویت‌کننده دارد.

در سال ۲۰۱۵ هان و همکاران [۷] به روش عددی اِل‌ای‌اِس[11] تابع پاسخ یک شعله پیچشی را استخراج کرد. وی نشان داد که در این شعله نیز با افزایش دامنه امواج صوتی، دامنه پاسخ شعله کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۱۸ گوردون و همکاران [۸] به طور همزمان از میکروفون و سیم-داغ[12] برای اندازه‌گیری نوسانات فشار و سرعت استفاده کردند و اثر تحریک شعله از بالادست و پایین‌دست را با یکدیگر مقایسه کردند. آن‌ها دریافتند که نتایج استخراج تابع پاسخ شعله از بالادست و پایین‌دست جریان یکسان است؛ به شرطی که نوسانات صوتی از جریان واکنش‌دهنده‌ها درست قبل از شعله داده‌برداری شود.

در سال ۲۰۱۰ ریاضی و همکاران [۹] بر روی شعله M شکل و V شکل به روش تجربی و در سال ۲۰۱۵ حاج‌علی‌گل و مظاهری [۱۰] بر روی شعله پیچشی آشفته به روش عددی اِل‌ای‌اِس مطالعاتی بر روی اندرکنش شعله با امواج صوتی داشتند. در سال ۲۰۲۲ اختردانش و همکاران [۱۱] با مطالعه اثر خاموشی شعله پیش‌آمیخته[13] بنسون تحت اثر امواج صوتی دریافتند که این پدیده به نسبت هم‌ارزی[14] شعله وابسته است. هم‌چنین اگر به‌جای موج سینوسی از امواج مربعی، مثلثی یا دندانه اره‌ای استفاده شود، روی پاسخ نرخ رهایش حرارت تأثیر چندانی نخواهد داشت؛ اما سطح شعله، ضخامت و طول لحظه‌ای شعله بنسون تغییر خواهد کرد [۱۲].

شعله نفوذی[15] (غیر-پیش‌آمیخته[16]) به‌دلیل داشتن طول زیاد و شعله پیش‌آمیخته به‌دلیل خطرات ناشی از مخلوط بودن سوخت و اکسنده قبل از واکنش شیمیایی، محققان را به استفاده از شعله پیش‌آمیخته جزئی علاقمند کرده است. در این نوع شعله سوخت با اندکی هوا پیش‌مخلوط شده‌است و وارد میدان واکنش می‌شود. در میدان واکنش هوای اضافی به مخلوط اضافه می‌شود تا فرایند احتراق کامل شود. به‌همین علت، در این پژوهش نیز از رژیم شعله پیش‌آمیخته جزئی استفاده شده‌است.

اندازه‌گیری نرخ رهایش حرارت در روش‌های تجربی یک چالش مهم محسوب می‌شود. کرباسی‌شارق و همکاران [۱۳] با مطالعه

[7] Swirl
[8] Laminar
[9] Counterflow Flame
[10] Saturation
[11] LES; Large Eddy Simulation
[12] Hot-wire
[13] Premixed
[14] Equivalence ratio
[15] Diffusion
[16] Non-Premixed

[Downloaded from joasi.ir on 2026-01-29]

روی رادیکال سی‌اِچ‌اِستار[17] بیان کردند که شدت تابش این رادیکال می‌تواند معیاری از شدت حرارت نسبی شعله باشد. در این پژوهش نیز به‌همین روش نرخ رهایش حرارت شعله استخراج شده‌است. به روش فوق، شیمی‌لیانسانی[18] سی‌اِچ‌اِستار نیز گفته می‌شود. شدت تابش رادیکال سی‌اِچ‌اِستار در بازه طول‌موج‌های نور مرئی است و طول‌موج ۴۳۰ نانومتر دارد. لذا می‌توان به کمک صافی بصری میان‌گذر[19]، از روی تصاویر لحظه‌ای شعله، شدت آن را به‌دست آورد. سپس به کمک نسبت تابش سی‌اِچ‌اِستار لحظه‌ای به سی‌اِچ‌اِستار میانگین شعله می‌توان نسبت نرخ رهایش حرارت لحظه‌ای شعله به نرخ رهایش حرارت متوسط را استخراج کرد [۱۴]، به بیان دیگر:

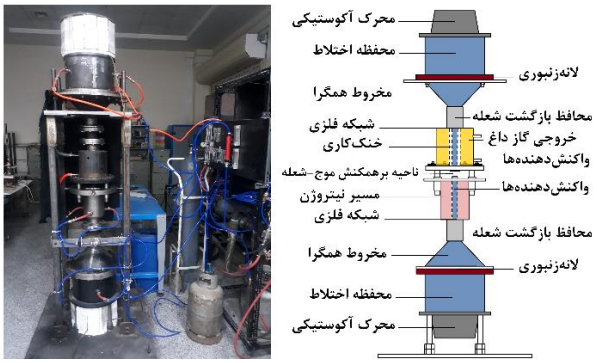
$$\frac{Q'}{\overline{Q}} \approx \frac{|CH^*|'}{|CH^*|} \quad . \qquad (۲)$$

در این پژوهش، ضمن استخراج پاسخ دینامیکی شعله در بازه ۳۵۰-۲۰ هرتز و دامنه امواج مختلف، به‌کمک یک کد پردازش تصاویر در نرم‌افزار متلب[20]، ضخامت، سطح و مرکز سطح تابش شعله نیز به‌صورت لحظه‌ای و میانگین استخراج و بررسی شده‌است.

در شعله‌های جریان متقابل دو شبه‌سنج[21] نرخ کرنش جریان و نسبت هم‌ارزی آن نقش مهمی در تشکیل شعله، محل قرارگیری، سطح و ضخامت شعله دارد. نرخ کرنش به سرعت و چگالی جریان واکنش‌دهنده‌ها و هم‌چنین فاصله شیپوره بالا و پایین بستگی دارد و برای شعله جریان متقابل از معادله (۳) پیروی می‌کند [۱۵]:

$$SR = \frac{۱V_{top}}{L}\left(۱ + \frac{V_{bottom}}{V_{top}}\sqrt{\frac{\rho_{bottom}}{\rho_{top}}}\right) \quad , \qquad (۳)$$

که در آن L فاصله شیپوره بالا و پایین از یکدیگر، V_{top} سرعت جریان واکنش‌دهنده‌های شیپوره بالا در خروجی شیپوره، V_{bottom} سرعت جریان واکنش‌دهنده‌های شیپوره پایین در خروجی شیپوره، ρ_{top} چگالی جریان شیپوره بالا و ρ_{bottom} چگالی جریان شیپوره پایین است. در تمامی آزمون‌ها نرخ کرنش شعله ثابت $\left(SR \approx ۱۴۳\frac{۱}{s}\right)$ نگه داشته شده‌است تا تغییری بر ساختار شعله نداشته باشد.



شکل ۱ آزمونگر شعله جریان متقابل با تحریک صوتی.

شبه‌سنج دیگری که بر ساختار شعله جریان متقابل اثرگذار است نسبت هم‌ارزی است. نسبت هم‌ارزی طبق معادله (۴) عبارت است از نسبت سوخت به هوای جریان به نسبت سوخت به هوای استوکیومتری:

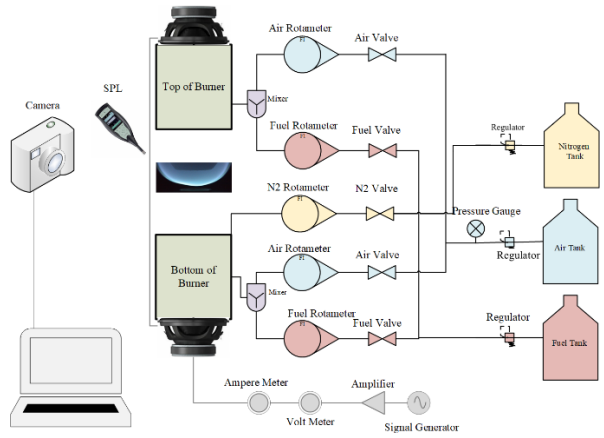
$$\varphi = \frac{F/A_{actual}}{F/A_{stoich}} \quad , \qquad (۴)$$

که در آن علاوه بر متغیرهای فوق، کمیت M_{ratio} نسبت تکانه[22] جریان خروجی از شیپوره بالا و پایین نیز در محل قرارگیری شعله اثرگذار است. از آنجا که فشار جریان خروجی از شیپوره بالا و پایین تقریبا یکسان است (هر دو مسیر از مخازن یکسان تغذیه می‌شود و افت هیدرولیکی دو مسیر به‌دلیل حضور شلنگ، روتامتر، شیر، محافظ بازگشت شعله، توری و لانه‌زنبوری یکسان، تقریباً برابر است) و برابر فشار محیط است، طبق معادله (۵) نسبت تکانه جریان بالا و پایین از نسبت هد دینامیک در جریان به‌دست می‌آید:

$$M_{ratio} = \frac{\rho_{top} V_{top}^{۲}}{\rho_{bottom} V_{bottom}^{۲}} \quad . \qquad (۵)$$

[17] CH*
[18] chemiluminescence
[19] Band-pass filter
[20] Matlab
[21] parameter
[22] momentum

[Downloaded from joasi.ir on 2026-01-29]



شکل ۲ رسم مدار هیدرولیک و مدار برقی آزمون.

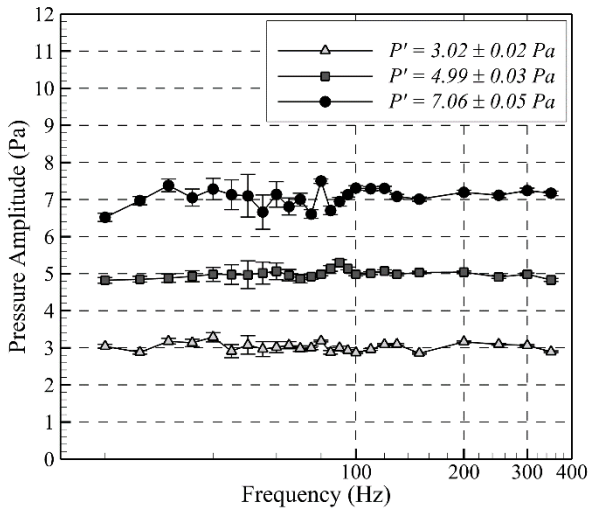
۲. مواد و روش‌ها

به منظور مطالعه تجربی پدیده اندرکنش امواج با شعله، از بستر آزمون تحریک شعله جریان متقابل مطابق شکل ۱ استفاده شد. تحریک شعله به کمک بلندگو بلک اِیر-۱۰[23] در بازه بسامدی ۲۰ الی ۳۵۰ هرتز انجام پذیرفت. بسامدهای پایین‌تر، به‌دلیل عدم توانایی بلندگو و بسامدهای بالاتر به‌دلیل عدم تأثیرگذاری بر روی شعله صرف‌نظر شد.

دامنه امواج صوتی به کمک صداسنج بروِال آند کی‌جی‌اِر ۲۲۵۰[24] اندازه‌گیری شده‌است. دقت اندازه‌گیری این وسیله ۱/۵ ± دسیبل در بازه بسامدی ۳ تا ۲۰۰۰۰ هرتز است. برای تبدیل شدت صوتی امواج به دامنه فشاری از معادله (۶) استفاده شده‌است:

$$dB=۲۰\log\left(\frac{P'}{P_{ref}}\right), \qquad (۶)$$

که در آن P_{ref}=۲۰ μPa. امواج صوتی به کمک یک نرم‌افزار مولد سیگنال[25]، تولید و از طریق تقویت‌کننده هرتز اِچ‌سی‌پی ۱دی‌کی[26] به بلندگو ارسال شده‌است. رسم مدار آزمونگر در شکل ۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۳ دامنه‌های اندازه‌گیری شده امواج صوتی تحریک شعله.

مطابق نمودار فشار صوتی بر حسب بسامد شکل ۳، سه دامنه فشار ثابت برای آزمون‌ها در نظر گرفته شد. بسامد مشخصه بازآوایش هلمهلتز[27] محفظه تحریک، از طریق معادله (۷) قابل محاسبه است:

$$\omega_0=\sqrt{c^۲S/VL_e}\ , \qquad (۷)$$

که در آن c سرعت صدا، S سطح مقطع شیپوره خروجی، V حجم محفظه و L_e طول موثر شیپوره است. با به‌کارگیری معادله (۷) بسامد بازآوایش محفظه ۴۴ هرتز به‌دست آمد. با این وجود، مقدار خطای استاندارد دامنه امواج صوتی از ۰/۷ درصد در این سه دامنه فشاری تجاوز نمی‌کند. علاوه بر این مسئله، به‌دلیل اینکه نرخ تغییرات شبه‌سنج‌های احتراقی شعله در بازه بسامدی ۲۰ تا ۸۰ هرتز بیش‌تر است، گسسته‌سازی بسامد امواج صوتی در این بازه ۵ هرتز، در بازه ۸۰ تا ۱۵۰ هرتز به میزان ۱۰ هرتز و در بازه بسامدی بیش از ۱۵۰ هرتز، ۵۰ هرتز در نظر گرفته شده‌است و محور افقی در مقیاس لگاریتمی رسم شده‌است.

برای انجام آزمون‌ها از گاز طبیعی شهر به‌عنوان سوخت و از هوای فشرده به‌عنوان اکسنده استفاده شده‌است. فشار هوا بعد از شیر فشارشکن مخزن آن، برابر ۳/۲ بار در تمامی آزمون‌ها تنظیم شده‌است. به منظور حفاظت شعله از اغتشاشات محیطی و هدایت

[23] Black Air 10
[24] Bruel & Kjaer 2250
[25] Frequency Signal Generator
[26] Hertz HCP 1DK
[27] Helmholtz Resonance

[Downloaded from joasi.ir on 2026-01-29]

فرآورده‌های واکنش سوخت و هوا، از جریان کنارگذر[۲۸] نیتروژن استفاده شده‌است. خلوص نیتروژن این جریان ۹۹/۹۹ درصد بوده تا اطمینان حاصل شود که جریان کنارگذر با واکنش‌دهنده‌ها وارد واکنش شیمیایی نشود. دبی حجمی جریان کنارگذر نیتروژن در تمامی آزمون‌ها ثابت و برابر ۲۰ لیتر در دقیقه بوده است. مقدار دبی کم‌تر سبب نفوذ شعله به جریان هم‌محور نیتروژن و مقدار بالاتر دبی موجب افزایش مصرف گاز نیتروژن خالص خواهد شد. رسم مدار آزمون در شکل ۳ دیده می‌شود. فاصله مرکز دو شیپوره از یکدیگر ۲/۰ سانتیمتر است. در جدول ۱ شرایط آزمون شعله جریان متقابل به صورت خلاصه آورده شده‌است.

جدول ۱ مشخصات شعله آزمون تحریک شعله جریان متقابل.

رژیم اختلاط	پیش‌آمیخته جزئی
رژیم آشفتگی	آرام
دبی هوای نازل بالا (لیتر در دقیقه)	۱۵
دبی سوخت نازل بالا (لیتر در دقیقه)	۰/۶۶
نسبت هم‌ارزی نازل بالا	۰/۶
دبی هوای نازل بالا (لیتر در دقیقه)	۱۵
دبی سوخت نازل بالا (لیتر در دقیقه)	۴/۱۶
نسبت هم‌ارزی نازل بالا	۲/۴
دبی نیتروژن کنارگذر (لیتر در دقیقه)	۲۰

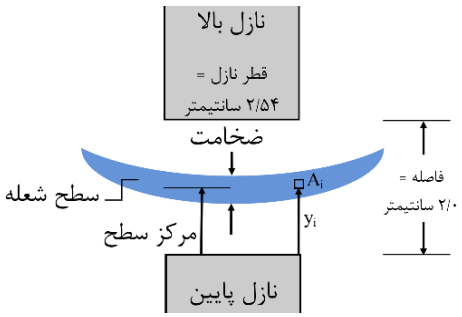
برای تصویربرداری از یک دوربین سرعت‌بالا سی‌موس[۲۹] با تفکیک ۱۲۸۰ در ۷۲۰ پیکسل و نرخ تصویربرداری ۱۹۲۰ قاب[۳۰] در ثانیه استفاده شده‌است. بزرگنمایی تصاویر به‌گونه‌ای است که قطر شیپوره با ۲۴۰ پیکسل مشخص می‌شود. در نتیجه مقیاس بزرگنمایی تصاویر ۰/۱۰۵ میلیمتر بر پیکسل است. تصویربرداری برای هر بسامد و دامنه تحریک، حداقل در ۳۰ چرخه[۳۱] تناوبی تحریک انجام شده‌است.

برای بررسی پدیده‌های فیزیکی حاکم بر مسئله نیاز است کمیت‌های لحظه‌ای شعله، تعریف دقیق ریاضی داشته باشد. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، حدفاصل بالاترین تا پایین‌ترین پیکسل تصویر صافی‌شده در نقطه مرکزی شعله، ضخامت لحظه‌ای شعله درنظر گرفته شده‌است. شبه‌سنج سطح شعله نیز از شمارش تعداد پیکسل‌های روشن (که دست‌کم شدت نور بالاتر از ۸۰ واحد داشته باشد) و ضرب آن در مقیاس طولی و عرضی پیکسل‌ها مشخص می‌شود.

شبه‌سنج شدت تابش نیز از انتگرال‌گیری شدت روشنایی تمامی پیکسل‌های تصویر صافی‌شده، محاسبه می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر نیز ذکر شد این شدت تابش، شدت تابش در طول‌موج ۴۳۰ نانومتر و بیان‌گر شدت تابش لحظه‌ای رادیکال سی‌اِچ‌اِستار و نرخ رهایش حرارت لحظه‌ای در شعله است. برای اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی شعله، از آنجا که لبه‌های شعله دائم در حال تغییرشکل است، روی خط تقارن مرکزی شعله با معادله (۸) محاسبه می‌شود:

$$Y_{CoHR}=\frac{\sum y_i I_i}{\sum I_i}\ , \qquad (۸)$$

که در آن y_i فاصله پیکسل از مرکز شیپوره پایین، I_i شدت تابش پیکسل در طول‌موج ۴۳۰ نانومتر و Y_{CoHR} مرکز سطح تابش شعله در لحظه است. تمام فرایند ذکر شده در بستر یک کد پردازش تصویر در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی و اجرا شده‌است.



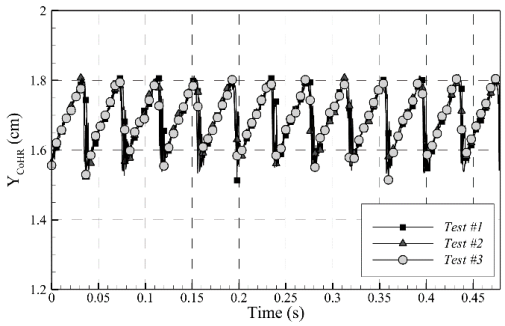
شکل ۴ رسم شبه‌سنج‌های سطح، ضخامت، جابه‌جایی مرکز سطح تولید حرارت شعله جریان متقابل.

برای سنجش تکرارپذیری نتایج آزمون‌ها، شعله جریان متقابل در بسامد ثابت ۲۵ هرتز و دامنه تحریک ثابت ۵ پاسکال سه مرتبه و به صورت مجزا آزموده شد. در شکل ۵ نمودار جابه‌جایی مرکز سطح تابش و در شکل ۶ نمودار شدت تابش رادیکال سی‌اِچ‌اِستار به‌صورت بی‌بعد شده، تابعی از زمان رسم شده‌است. برای سنجش صحت آنالیز کد پردازش تصویر، از نتایج جابه‌جایی مرکز سطح

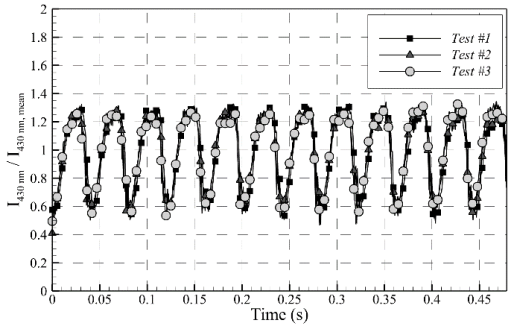
[28] Coflow
[29] CMOS
[30] frame
[31] cycle

[Downloaded from joasi.ir on 2026-01-29]

سه آزمون تکرار تبدیل فوریه سریع[32] گرفته شده‌است تا از درستی بسامد نتایج خروجی و یکسان بودن دامنه نتایج سه آزمون اطمینان حاصل شود. نتیجه در شکل ۷ نمایش داده شده‌است. مشاهده می‌شود که نتایج خروجی نیز بسامد ۲۵ هرتز و مضارب صحیح آن را نمایش می‌دهد.

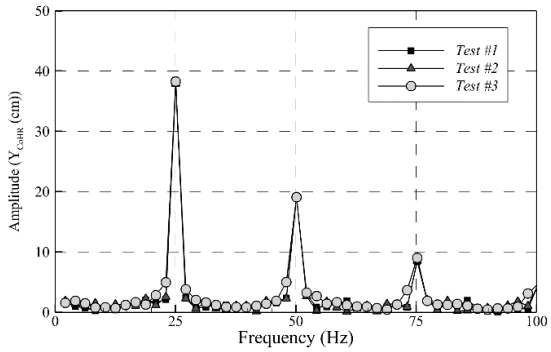


شکل ۵ جابه‌جایی مرکز سطح تابش شعله در سه آزمون تکرار در بسامد ۲۵ هرتز و دامنه فشار ۵ پاسکال.



شکل ۶ شدت تابش بی‌بعد شده رادیکال سی‌اِچ‌اِستار در سه آزمون تکرار در بسامد ۲۵ هرتز و دامنه فشار ۵ پاسکال.

برای بررسی کمی داده‌ها پس از پردازش تصویر، دو کمیت جابه‌جایی مرکز سطح تابش و شدت تابش رادیکال سی‌اِچ‌اِستار در سه آزمون تکراری در جدول ۲ مقایسه شده‌است. نتایج به‌دست آمده نشانگر آن است که در سه آزمون مختلف خطای محاسبه کمیت‌های محل مرکز سطح میانگین شعله و شدت تابش رادیکال سی‌اِچ‌اِستار در طول‌موج ۴۳۰ نانومتر کم‌تر از ۰٫۴ درصد است. بررسی ۳۰ چرخه تحریک نیز نشان داد که خطای محاسبه دامنه نوسانات کمیت‌های دامنه جابه‌جایی مرکز سطح و شدت تابش رادیکال سی‌اِچ‌اِستار شعله کم‌تر از ۱٫۶ درصد است.



شکل ۷ تبدیل فوریه سریع جابه‌جایی مرکز سطح شعله در سه آزمون تکرار در بسامد ۲۵ هرتز و دامنه فشار ۵ پاسکال.

جدول ۲ کمیت‌های میانگین و دامنه تغییرات آن در بسامد ۲۵ هرتز و دامنه فشار ۵ پاسکال.

آزمون	مقادیر میانگین		دامنه تغییرات	
	$\bar{Y}_{CoHR}$ (cm)	$\bar{I}$	Y'_{CoHR} (cm)	I'
۱	۱٫۷۰	۴۵۵۲۵۴	۰٫۱۵	۱۹۶۲۴۵
۲	۱٫۷۰	۴۶۲۸۹۷	۰٫۱۵	۲۰۷۴۸۳
۳	۱٫۶۹	۴۵۹۸۴۲	۰٫۱۵	۲۰۲۴۲۶
انحراف معیار	۰٫۰۱	۳۸۴۷	۰٫۰۰	۵۶۲۸
خطا ٪	۰٫۲	۰٫۴	۰٫۰	۱٫۶

۳. نتایج

قبل از آغاز تحریک صوتی شعله، کمیت‌های احتراقی آن به‌تعداد ۱۰۰۰ مرتبه داده‌برداری شده‌است و نتایج آن در جدول ۳ و تصویر شعله بدون تحریک صوتی در شکل ۹ مشاهده می‌شود. به کمک انحراف معیار[33] داده‌ها و خطای استاندارد[34]، بازه تغییرات هر شبه‌سنج نیز ذکر شده‌است. در مورد کمیت شدت تابش رادیکال سی‌اِچ‌اِستار در طول‌موج ۴۳۰ نانومتر مقدار این عدد بزرگ و از مرتبه 10^{7} است. برای مقایسه بهتر این کمیت با مقدار میانگین

[32] Fast Fourier Transform
[33] Standard Deviation
[34] Standard Error

[Downloaded from joasi.ir on 2026-01-29]

خود، بی‌بعد شده‌است تا مقدار خطا و انحراف معیار آن قابل درک‌تر باشد.

شکل ۸ شعله جریان متقابل (راست) و تصویر نورتابی شیمیایی سی‌اِچ‌اِستار با صافی اپتیکی ۴۳۰ نانومتر (چپ) قبل از تحریک صوتی.

مقدار مطلق شدت تابش با تغییر بزرگنمایی لنز دوربین و تغییر شدت صافی‌کردن نویز تصاویر، عوض می‌شود؛ اما مقدار بی‌بعدشده آن مستقل از بزرگنمایی تصویر و شدت صافی‌کردن نویز است.

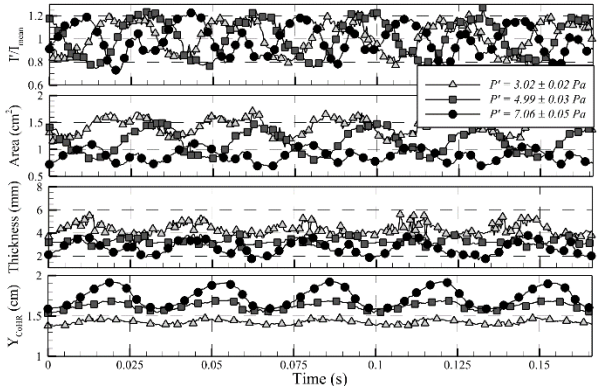
جدول ۳ کمیت‌های میانگین و دامنه آن برای شعله بدون تحریک صوتی.

$\bar{t}$ (mm)	$\bar{A}$ (cm^2)	$\bar{Y}_{CoHR}$ (cm)	$\bar{I}$
۵٫۵۲ ± ۰٫۱۰	۲٫۲۰ ± ۰٫۰۹	۱٫۵۳ ± ۰٫۰۱	۱٫۰۰ ± ۰٫۰۴

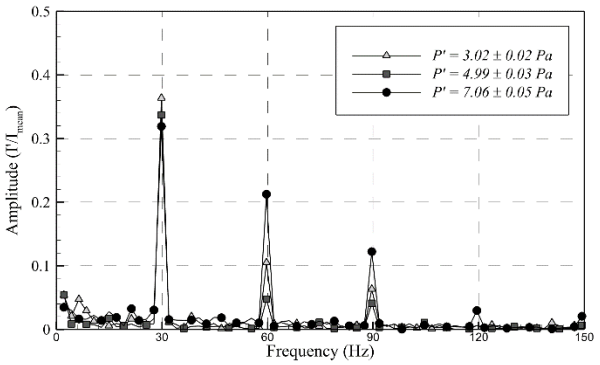
نتایج حاصل نشان می‌دهد که تغییرات شدت تابش رادیکال سی‌اِچ‌اِستار شعله جریان متقابل آرام پایا و بدون تحریک کم‌تر از ۴ درصد است. سطح شعله نیز تغییرات کم‌تر از ۴٫۱ درصد دارد.

۳-۱. دینامیک شعله در بسامد ۳۰ هرتز

برای بررسی دینامیک شعله، رفتار کمیت‌های دینامیکی آن در بسامد ۳۰ هرتز و ۷۰ هرتز به تفکیک بررسی شده‌است. در شکل ۹ به ترتیب جابه‌جایی مرکز سطح شعله، سطح شعله لحظه‌ای، ضخامت و شدت تابش رادیکال سی‌اِچ‌اِستار یا به عبارت دیگر نرخ رهایش حرارت لحظه‌ای شعله برای سه دامنه فشار مختلف ترسیم شده‌است.



شکل ۹ جابه‌جایی مرکز سطح تابش، سطح، ضخامت و نرخ رهایش حرارت لحظه‌ای شعله در بسامد ۳۰ هرتز و دامنه‌های فشار مختلف.



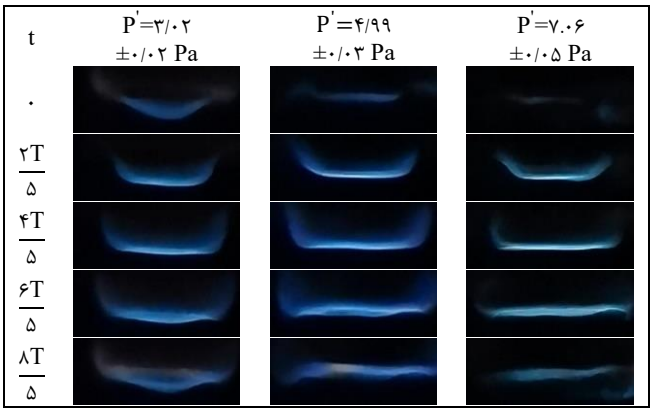
شکل ۱۰ تبدیل فوریه سریع نرخ رهایش حرارت لحظه‌ای شعله در بسامد ۳۰ هرتز و دامنه‌های فشار مختلف.

درصورتی که حرکت همزمان هرسه دامنه موج بررسی شود، مشاهده می‌شود یک عقب‌افتادگی[۳۵] فاز در هر سه کمیت سطح، ضخامت و شدت تابش رادیکال سی‌اِچ‌اِستار مشاهده می‌شود. علت این امر این است که هرچه دامنه فشاری افزایش می‌یابد، شعله تا فواصل نزدیک شیپوره فوقانی پیش می‌رود و در نتیجه از نقطه سکون[۳۶] شعله جریان متقابل عبور می‌کند. عبور کردن جبهه شعله از نقطه سکون شعله سبب تأخیر در رسیدن سوخت به ناحیه واکنشی می‌شود. در دامنه فشار پایین، حرکت شعله در سمت پایین نقطه سکون شعله است و به نقطه سکون برخورد ندارد. لذا عقب‌افتادگی فاز بین کمیت جابه‌جایی مرکز سطح و نرخ رهایش حرارت دیده نمی‌شود.

[35] Lag

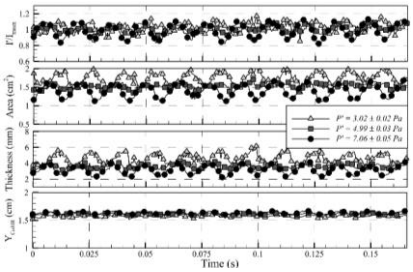
[36] Stagnation point

[Downloaded from joasi.ir on 2026-01-29]

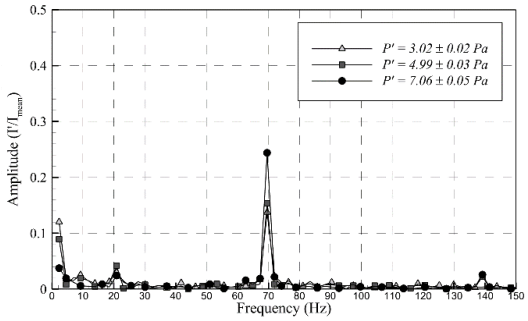


شکل ۱۱ تصاویر لحظه‌ای شعله در بسامد ۲۰ هرتز.

هم‌چنین مشهود است که هرچه دامنه موج صوتی تضعیف شده، میزان اغتشاشات تصادفی روی نتایج خروجی افزایش یافته است. دامنه جابه‌جایی مرکز سطح شعله متناسب با دامنه امواج صوتی اعمال شده‌است. به کمک تبدیل فوریه سریع از نتیجه شدت تابش رادیکال سی‌اِچ‌اِستار یا همان نرخ رهایش حرارت، دامنه اندازه‌گیری شده در نتایج خروجی در شکل ۱۰ بررسی شده‌است. مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه فشار امواج، دامنه نرخ رهایش حرارت شعله تغییرات اندکی دارد. این نتیجه در تطابق با مطالعات مشابه روی شعله‌های مخروطی، پیچشی و V شکل است [۳و۶]. شکل ۱۱ یک چرخه تحریک شعله جریان متقابل را در بسامد ۲۰ هرتز برای سه دامنه فشار مختلف با یکدیگر مقایسه می‌کند. هرچه دامنه موج صوتی افزایش یافته، ضخامت میانگین شعله کاهش یافته و در نتیجه نرخ رهایش حرارت آن کاهش خواهد یافت. در سرتاسر حرکت هارمونیک شعله تخت بودن خود را حفظ می‌کند و دچار پیچش نمی‌شود. هرچه دامنه فشار امواج افزایش یافته است، در نقطه کم‌ترین سطح شعله و کم‌ترین شدت تابش رادیکال سی‌اِچ‌اِستار، شعله به حالت خاموشی محلی نزدیک‌تر شده‌است.



شکل ۱۲ جابه‌جایی مرکز سطح تابش، سطح، ضخامت و نرخ رهایش حرارت لحظه‌ای شعله در بسامد ۷۰ هرتز و دامنه‌های فشار مختلف.

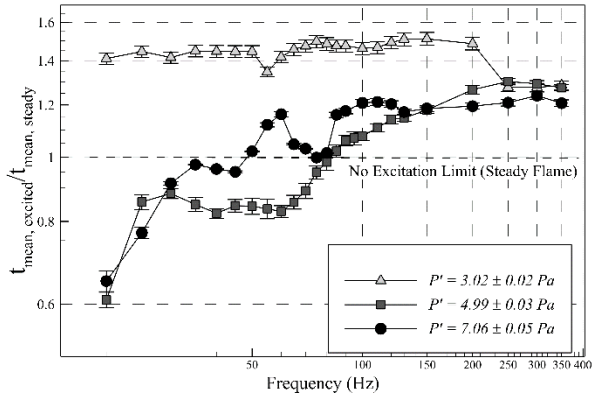


شکل ۱۳ تبدیل فوریه سریع نرخ رهایش حرارت لحظه‌ای شعله در بسامد ۷۰ هرتز و دامنه‌های فشار مختلف.

۳-۲. دینامیک شعله در بسامد ۷۰ هرتز

جابه‌جایی مرکز سطح شعله در دامنه امواج صوتی مختلف برای بسامد ۷۰ هرتز در شکل ۱۲ ترسیم شده‌است. حرکت بسامد بالا شعله در دامنه‌های کوچک به اغتشاشات تصادفی زیادی همراه است و لذا این اغتشاشات تصادفی در سایر کمیت‌های شعله نیز اثر گذاشته است. نمودار شکل ۱۳ نشان می‌دهد، دامنه نوسانات نرخ رهایش حرارت نسبت به تحریک بسامد پایین، تضعیف شده‌است. با افزایش بسامد امواج صوتی، زمان اثرگذاری امواج روی شعله هم‌مرتبه با زمان واکنش شیمیایی سوخت با هوا و زمان لازم برای تکمیل اختلاط سوخت با هوا می‌شود.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-01-29]



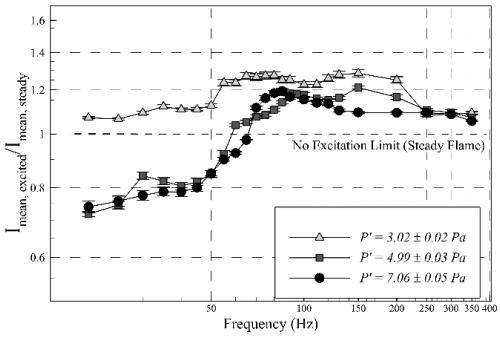
شکل ۱۴ ضخامت میانگین شعله تحریک شده به شعله پایا در دامنه‌های فشار صوتی مختلف.

۴. بحث

در شکل ۱۴ نمودار ضخامت میانگین شعله در حالت تحریک شده به شعله بدون تحریک صوتی نمایش داده شده‌است. رفتار شعله در بسامدهای پایین به دامنه امواج وابستگی دارد. هرچه دامنه فشار امواج صوتی افزایش یابد، ضخامت شعله تحریک شده نسبت به شعله بدون تحریک کاهش خواهد یافت:

$$\delta=\frac{D}{SR}\ , \qquad (۹)$$

که با افزایش بسامد امواج صوتی تحریک، شعله ضخیم‌تر می‌شود. ضخامت شعله جریان متقابل از معادله (۹) تبعیت می‌کند [۱۶] که در آن D ضریب نفوذ و δ ضخامت شعله است. از آنجا که در SR نرخ کرنش ثابت، تحریک امواج صوتی صورت می‌پذیرد، نتیجه می‌شود با افزایش بسامد تحریک، ضریب نفوذ D نیز افزایش می‌یابد و به بیان دیگر با افزایش بسامد تحریک، مقدار سوخت و اکسنده بیش‌تری در هم نفوذ می‌کند و لایه اختلاط و واکنش شعله ضخیم‌تر می‌شود. در شکل ۱۵ شدت تابش رادیکال سی‌اِچ‌اِستار میانگین شعله تحریک شده نسبت به شعله پایا رسم شده‌است.



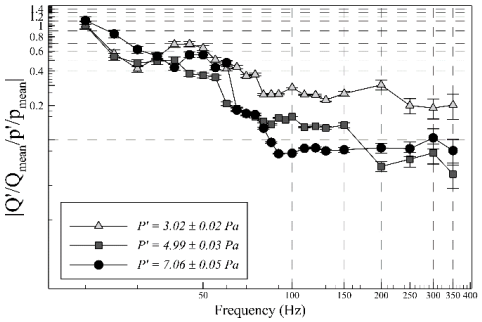
شکل ۱۵ شدت تابش سی‌اِچ‌اِستار میانگین تحریک شده به شعله پایا در دامنه‌های فشار صوتی مختلف.

رفتار نمودار شکل ۱۵ در بسامدهای پایین مشابه نمودار شکل ۱۴ مربوط به ضخامت شعله است. تنها یک تفاوت در این دو نمودار مشهود است؛ با افزایش بسامد امواج تحریک شعله به مقادیر بیش از ۲۰۰ هرتز، ضخامت شعله تحریک شده حدودا ۲۰ درصد بیش از یک شعله بدون تحریک است؛ اما در مورد شدت تابش رادیکال سی‌اِچ‌اِستار و نرخ رهایش حرارت، با افزایش بسامد تحریک، تابش شعله به شعله بدون تحریک میل می‌کند. به‌عبارت دیگر با افزایش بسامد شدت تابش شعله و نرخ رهایش حرارت آن دیگر تابع امواج صوتی نخواهد بود.

شکل ۱۶ تابع پاسخ شعله جریان متقابل به ورودی نوسانات فشار صوتی را نشان می‌دهد. پاسخ شعله به هر سه دامنه امواج صوتی رفتار مشابهی دارد و به‌صورت یک صافی پایین‌گذر رفتار می‌کنند؛ یعنی شعله از امواج صوتی بسامد پایین اثر می‌پذیرد؛ ولی امواج صوتی بسامد بالا را صافی می‌کند. این رفتار در شعله‌های ساده دیگر همچون شعله بنسون، M شکل و شعله V شکل نیز دیده می‌شود و رفتار ذاتی این نوع شعله‌هاست [۳]. علت این امر این است که با کاهش مقیاس زمانی اثرگذاری امواج صوتی، این پدیده سریع‌تر از تغییرات نرخ واکنش شیمیایی رخ می‌دهد و بر روی نرخ رهایش حرارت شعله اثرگذار نخواهد بود.

ویژگی دیگر پاسخ جریان متقابل این است که در بسامدهای پایین، اندازه تابع پاسخ شعله به مقدار واحد میل کند. به عبارت دیگر در بسامدهای پایین نرخ رهایش حرارت با همان دامنه امواج صوتی نوسان می‌کند. این رفتار هم در شعله‌های ساده قبلا مشاهده شده‌است [۱۷].

[Downloaded from joasi.ir on 2026-01-29]



شکل ۱۶ اندازه تابع پاسخ شعله در دامنه‌های مختلف تحریک.

اثر افزایش دامنه فشار بر روی پاسخ دینامیکی شعله جریان متقابل پیش‌آمیخته جزئی در شکل ۱۶ مشهود است. در بسامدهای پایین (کم‌تر از ۶۰ هرتز)، اثر تغییرات دامنه فشار روی پاسخ دینامیکی شعله ناچیز است. به عبارت دیگر هر اندازه دامنه نوسانات نرخ رهایش حرارت تغییر کند به همان اندازه میانگین نرخ رهایش حرارت نیز تغییر می‌کند و اثری بر پاسخ دینامیکی شعله نخواهد داشت. با افزایش بسامد (بیش‌تر از ۸۰ هرتز)، با افزایش دامنه فشار امواج تحریک صوتی، اندازه پاسخ شعله کاهش پیدا می‌کند. یعنی در این بازه بسامدی اثر دامنه امواج بر افزایش میانگین نرخ رهایش حرارت بیش‌تر از افزایش نوسانات نرخ رهایش حرارت است.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اندرکنش امواج صوتی با شعله جریان متقابل آرام به روش تجربی غیرتداخلی شیمی‌لیانسانی رادیکال سی‌اِچ‌اِستار بررسی شده‌است. اثرات تغییر بسامد و دامنه امواج صوتی بر ساختار یک شعله پیش‌آمیخته جزئی در رژیم آرام در بازه بسامدی ۲۰ تا ۳۵۰ هرتز بررسی شد. با افزایش بسامد امواج صوتی تحریک شعله، در مقایسه با شعله بدون تحریک پایا، ضخامت میانگین شعله، سطح شعله و نرخ رهایش آن افزایش یافت و محل میانگین مرکز سطح شعله پایین‌تر بود. تابع پاسخ دینامیکی شعله پیش‌آمیخته جزئی جریان متقابل استخراج شد و نشان داده شده در بسامدهای پایین اندازه تابع پاسخ به مقدار واحد میل می‌کند. با افزایش بسامد مقدار تابع پاسخ تضعیف می‌شود. افزایش دامنه نوسانات صوتی بر روی اندازه پاسخ شعله تأثیر اندکی دارد و در بسامدهای بالا سبب تضعیف پاسخ می‌شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از دانشکده مهندسی هوافضا دانشگاه صنعتی شریف، بخاطر در اختیار قرار دادن آزمایشگاه سوخت و احتراق پیشرفته، برای انجام این پژوهش کمال قدردانی را دارند.

تضاد منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌کنند، هیچ‌گونه تضاد منافعی که بر انتشار محتوای این مقاله تأثیر بگذارد، وجود ندارد.

فهرست منابع

[1] P. Palies, D. Durox, T. Schuller, S. Candel, "The combined dynamics of swirler and turbulent premixed swirling flames," Combust and Flame, vol. 157, no. 9, pp. 1698–1717, Sep. 2010.

[2] N. Peters, "Laminar flamelet concepts in turbulent combustion," Twenty-first Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 1231–1250, 1986.

[3] D. Durox, T. Schuller, N. Noiray, S. Candel, "Experimental analysis of nonlinear flame transfer functions for different flame geometries," Proceedings of the Combustion Institute, vol. 32, no. 1, pp. 1391–1398, 2009.

[4] A. Cuquel, D. Durox, T. Schuller, "Impact of flame base dynamics on the non-linear frequency response of conical flames," Comptes Rendus Mécanique, vol. 341, no. 1–2, pp. 171–180, Jan. 2013.

[5] K. Oberleithner, S. Schimek, C. Paschereit, "Shear flow instabilities in swirl-stabilized combustors and their impact on the amplitude dependent flame response: A linear stability analysis," Combust and Flame, vol. 162, no. 1, pp. 86–99, Jan. 2015.

[6] A. Saurabh, C. Paschereit, "Dynamics of premixed swirl flames under the influence of transverse acoustic fluctuations," Combust and Flame, vol. 182, pp. 298–312, 2017.

[7] X. Han, J. Li, A. Morgans, "Prediction of combustion instability limit cycle oscillations by combining flame describing function simulations with a thermoacoustic network model," Combust and Flame, vol. 162, no. 10, pp. 3632–3647, Oct. 2015.

[8] R. Gaudron, M. Gatti, C. Mirat, T. Schuller, "Flame describing functions of a confined premixed swirled combustor with upstream and downstream forcing," Volume 4B: Combustion, Fuels, and Emissions, Jun. 2018.

[9] R. Riazi, N. Nabatian, M. Farshchi, "V-shaped and m-shaped premixed flame response to acoustic excitations,"Fuel and Combustion, vol. 3, no. 2, pp. 59-73, 2011.

[10] N. Hajialigol, K. Mazaheri, "Turbulent lean premixed flame response to the imposed inlet oscillating velocity and effect of the equivalence ratio and inlet temperature on it," Fuel and Combustion, vol. 9, no. 2, pp. 21-37,

[Downloaded from joasi.ir on 2026-01-29]

2017.

[11] M. Akhtardanesh, M. Khadem Alrezaeian, M. Hosseinkhani, M. Farshchi, “An experimental study on Bunsen flame acoustic extinction,” The 21st International Conference of Iranian Aerospace Association, pp. 1–6, 2022.

[12] M. Akhtardanesh, M. Khadem Alrezaeian, M. Farshchi, “The Acoustic Wave Shape Effects on the Dynamic Response of the Premixed Bunsen Flame,” 7th National Conference on Mechanical and Aerospace Engineering, pp. 1–19, 2022.

[13] K. Karbasishargh, M. Salehi, A. Mardani, “CH* Chemiluminescence measurement in sooting Flames,” Fuel and Combustion, vol. 15, no. 2, pp. 75-89, 2022.

[14] A. De Rosa, S. Peluso, B. Quay, D. Santavicca, “The effect of confinement on the structure and dynamic response of lean-premixed, swirl-stabilized flames,” Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 138, no. 6, p. 061507, 2015.

[15] T. Brown, R. Pitz, “Experimental investigation of counterflow diffusion flames with oscillatory stretch,” 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1996.

[16] C. Sung, C. Law, “Dominant chemistry and physical factors affecting no formation and control in oxy-fuel burning,” Proceedings of the Combustion Institute, vol. 27, no. 1, pp. 1411–1418, 1998.

[17] W. Polifke, C. Lawn, “On the low-frequency limit of flame transfer functions,” Combust and Flame, vol. 151, no. 3, pp. 437–451, 2007.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-01-29]