

مطالعه تجربی خاموشی آکوستیک شعله پیش آمیخته بنسون

محمدعلی اختردانش^{۱*}، میثم خادم‌الرضاییان^۲، محمدجواد حسین خانی^۳، محمد فرشچی^۴

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

۲- کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، khademal-rezaeian.meysam@ae.sharif.edu

۳- کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، mj.hosseinihah@ae.sharif.edu

۴- هیئت علمی دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، farshchi@sharif.edu

*نویسنده مخاطب

چکیده

یکی از روش‌های خاموش کردن شعله در کاربردهای ایمنی و آتش‌نشانی، استفاده از امواج آکوستیکی است. همچنین به منظور مطالعه پایداری شعله‌های گوناگون در برابر امواج آکوستیکی و بررسی پتانسیل کوپل شدن شعله با این امواج، مسئله خاموشی شعله با استفاده از امواج آکوستیکی مطرح می‌شود. در این پژوهش پدیده خاموشی یک شعله پیش‌آمیخته بنسون با امواج آکوستیکی به روش تجربی بررسی شده است. برای مطالعه این پدیده یک آزمونگر با قابلیت تحریک آکوستیکی شعله‌های گوناگون ساخته شد. شعله‌های گوناگون با استفاده از دو سوخت متان و پروپان در محدوده فرکانسی ۱۲۰-۲۰۰ Hz بررسی شدند و مشخص شد با افزایش فرکانس موج، دامنه فشاری قوی‌تری برای خاموشی یک شعله نیاز است. همچنین نتایج نشان داد که برای سوخت متان در نسبت هم‌ارزی $\phi=1.09$ پایداری شعله در برابر امواج آکوستیکی در مقایسه با سایر نسبت هم‌ارزی‌ها افزایش می‌یابد. این مقدار برای سوخت پروپان در نسبت هم‌ارزی $\phi=1.04$ رخ می‌دهد. در صورتی که شعله درون یک محفظه استوانه‌ای قرار گیرد و محصور شود، پایداری شعله در برابر امواج آکوستیکی تغییر خواهد کرد. اثرات تغییر قطر دیواره بر پایداری شعله در برابر امواج آکوستیکی نیز بررسی شد. نتایج نشان داد که با کاهش قطر دیواره، طول و سطح شعله افزایش می‌یابد. افزایش این دو پارامتر منجر به افزایش نرخ آزادسازی حرارت خواهد شد و در نتیجه با کاهش قطر محفظه، پایداری آن در برابر امواج آکوستیکی افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: شعله پیش‌مخلوط - آکوستیک - خاموشی - شعله محصور - ناپایداری احتراق.

۱- مقدمه

در سال ۱۷۷۷ پدیده تاثیرگذاری موسیقی بر شعله توجه بایرون هیگینز (Byron Higgins) را به خود جلب کرد و در سال ۱۸۶۷ تیندال (Tyndall) از پدیده برهمکنش شعله و صوت پرده برداشت. خاموش کردن شعله به کمک امواج آکوستیکی یکی از روش‌های نوینی است که به علت سازگاری با محیط زیست، توجه محققان در حوزه آتش‌نشانی را به خود جلب کرده است [۱]. در حالی که متخصصان آتش‌نشانی در تلاش هستند به کمک امواج آکوستیک شعله را خاموش کنند، متخصصین حوزه ناپایداری

احتراق از مطالعه برهمکنش امواج با شعله قصد دارند پایداری شعله را افزایش دهند. پدیده مخرب ناپایداری احتراق عبارت است از نوسانات بزرگ دامنه در فشار یا حرارت شعله [۲]. ناپایداری احتراق می‌تواند به اثراتی از قبیل ایجاد تنش حرارتی روی بدنه محفظه احتراق، تولید صدا، پریدن شعله (Blow off)، پس‌زنی شعله (Flash back)، لرزش و انفجار محفظه منجر شود. محققین در حوزه ناپایداری احتراق به دنبال یافتن راه‌هایی هستند که بتواند شعله و محفظه احتراق را از این اثرات مخرب دور کند. در نتیجه شناخت پدیده خاموشی شعله در اثر مواجهه با امواج آکوستیکی و عوامل موثر بر آن اهمیت فراوان دارد.

پدیده خاموشی شعله یک فرایند محلی است که ممکن است برای بخشی از شعله یا تمام آن رخ دهد. عدد بی‌بعد کارلوویتز (Karlovitz) عبارت است نسبت مقیاس زمانی واکنش شیمیایی به مقیاس زمانی فیزیکی جریان. در صورتی که این دو مقیاس زمانی هم‌مرتبه باشند، خاموشی شعله رخ خواهد داد [۳]. عدد کارلوویتز برای یک شعله جریان متقابل به صورت (۱) تعریف می‌شود.

$$Ka = \frac{\text{Chemical Time Scale}}{\text{Physical Flow Time}} = \frac{\delta_L/S_L}{K} \quad (1)$$

δ_L طول مشخصه شعله، S_L سرعت انتشار شعله و K نرخ کشیدگی شعله است. در آزمایش‌های تجربی عدد کارلوویتز سوخت‌های گوناگون از ۲۰ تا ۰/۰۳ تغییر می‌کند. فشار نیز بر خاموشی شعله اثر دارد. در یک شعله پیش‌مخلوط جریان متقابل، در نسبت هم‌ارزی $\phi=1.3$ نرخ کرنش خاموشی شعله با افزایش فشار آزمایش، کاهش یافت [۴].

برای نوک شعله بنسون مقیاس زمانی فیزیکی جریان به صورت $4U/R$ است. نتایج آزمون‌های تجربی نشان می‌دهد، شعله پروپان در نسبت هم‌ارزی $\phi=1.44$ و بیشتر، به صورت محلی دچار خاموشی نوک شعله می‌شود. علت این امر این است که با افزایش نسبت هم‌ارزی، شعاع نوک شعله، سرعت شعله و طول آن به گونه‌ای تغییر می‌کند که عدد کارلوویتز نوک شعله افزایش می‌یابد [۵].

در صورتی که یک شعله بنسون با نسبت هم‌ارزی $\phi=1.6$ با امواج آکوستیکی با دامنه‌های فشاری ۱۲۰ dB در فرکانس ۱۰۰ Hz مواجه شود، شعله به دو تکه تقسیم می‌شود. تکه اول به مشعل چسبیده باقی می‌ماند. تکه دوم به سمت پایین دست جریان حرکت کرده و در فاصله‌ای اندک دچار پدیده خاموشی می‌شود. این پدیده با پدیده Blow off کاملاً متفاوت

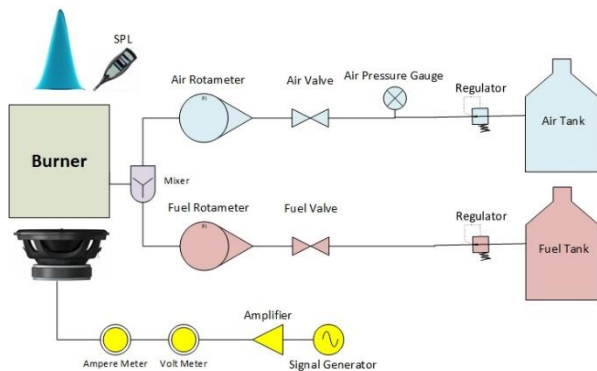
از نسبت هم ارزی و دو نوع سوخت مختلف انجام شده است. سپس اثرات حضور دیواره در خاموشی شعله بررسی شده است.

۲- آزمایشگاه تجربی

به منظور انجام آزمون‌ها، یک بستر آزمون متشکل از یک محفظه ورود جریان، نازل همگرا، لانه زنبوری، محافظ بازگشت شعله و دو ردیف مش برای از بین بردن گردابه‌های درونی محفظه استفاده شده است (شکل ۱). قطر نازل خروجی جریان مشعل $D = 24.3 \text{ mm}$ است. برای تحریک شعله یک بلندگو Black Air 10 که محدوده عملکرد $1600 - 20 \text{ Hz}$ دارد به کار برده شده است. دامنه امواج آکوستیکی به کمک یک صوت‌سنج B&K Bruel & Kjaer 2250 اندازه‌گیری شده است. دقت اندازه‌گیری این وسیله $\pm 1.5 \text{ dB}$ در محدوده فرکانس $2000 - 3 \text{ Hz}$ است. برای تبدیل شدت صوت امواج به دامنه فشار از معادله (۳) استفاده می‌شود.

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

که در آن $P_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$ برای عکسبرداری از دوربین Nikon 1 J4 با رزولوشن 3500 در 5200 پیکسل و یک فیلتر اپتیکی 430 nm با پهنای باند 10 nm استفاده شده است. در هنگام تصویربرداری سرعت‌بالا نرخ تصویربرداری تا 900 فریم در ثانیه افزایش و رزولوشن تصاویر به مقدار 720 در 1280 پیکسل کاهش یافته است. تصاویر فیلتر شده در حالت عکسبرداری گرفته شده و شدت تابش رادیکال CH^* با پردازش تصویر (مجموع 10 تصویر از شعله بدون تحریک) توسط نرم‌افزار MATLAB استخراج شده است.



شکل ۲- شماتیک مدار هیدرولیک و مدار الکتریکی آزمون

از سه جداره پیرکس با قطرهای $6.5, 8.5$ و 10.5 cm D_{wall} به عنوان دیواره محفظه شعله استفاده شد. به منظور مطالعه اثرات دیواره از شعله متان با مشخصات جدول ۱ بهره گرفته شد.

جدول ۱- مشخصات آزمون تحریک شعله بنسون در حضور دیواره

$C_r = D_{burner}/D_{wall}$	$D_{wall} \text{ (cm)}$	
۰.۳۷	۶.۵	آزمون ۱
۰.۲۹	۸.۵	آزمون ۲
۰.۲۳	۱۰.۵	آزمون ۳
.	∞	آزمون ۴

از متان خالص و پروپان به عنوان سوخت و از هوای فشرده به عنوان اکسنده آزمون استفاده شده است. هر سه سیال در مخزن تحت‌فشار مربوطه نگهداری می‌شود. بعد از هر مخزن یک رگلاتور وظیفه تنظیم فشار تغذیه را بر عهده دارد. برای اندازه‌گیری دبی هوا از روماتر Dwyer RMB با

است. زیرا شعله دچار خاموشی کامل نمی‌شود و فقط بخشی از آن به صورت محلی خاموش می‌شود [۶].

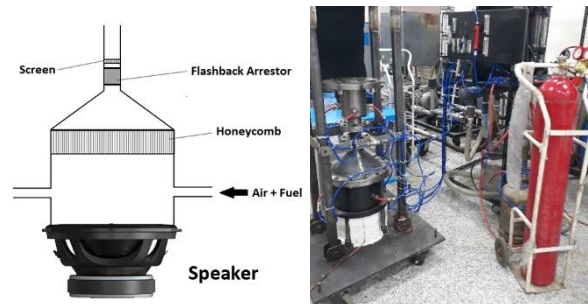
پدیده خاموشی شعله در مواجهه با امواج آکوستیکی در شعله بنسون نفوذی نیز مشاهده شده است. برای بررسی این پدیده شعله نفوذی بنسون با گاز طبیعی در مواجهه با امواج آکوستیکی کم فرکانس $28-52 \text{ Hz}$ قرار داده شد. مشاهدات نشان داد که با افزایش فرکانس، توان آکوستیکی امواج لازم جهت خاموشی شعله نفوذی گاز طبیعی افزایش خواهد یافت. اثر تغییر دبی جرمی گاز بر نتایج خاموشی آکوستیک شعله اندک بود [۷].

اثرات محصور کردن شعله‌های گوناگون از جمله شعله بنسون، شعله پیچشی (swirl) و شعله M شکل بر روی پاسخ دینامیکی شعله بررسی شده است. در این مسئله نسبت محصور شدگی $C_r = R_{burner}/R_{wall}$ و نسبت انبساط $E = \rho_u/\rho_b$ بر روی پاسخ دینامیکی شعله اثرگذار است. تابع پاسخ دینامیکی شعله (۲) عبارت است از نسبت نوسانات آزادسازی حرارت شعله به نسبت نوسانات آکوستیکی فشاری امواج.

$$FTF = \frac{\dot{Q}'/\bar{Q}}{p'/\bar{p}} \quad (2)$$

که در آن \dot{Q}' نرخ آزادسازی حرارت لحظه‌ای، \bar{Q} نرخ آزادسازی حرارت میانگین، p' اغتشاشات فشار آکوستیکی و \bar{p} فشار میانگین است. هرچه نسبت محصورشدگی افزایش پیدا کند (شعاع محفظه کاهش پیدا کند) مولفه محوری گازهای احتراقی افزایش پیدا می‌کند و لذا طول شعله نیز افزایش می‌یابد. اندازه تابع پاسخ دینامیکی چنین شعله‌ای از یک شعله بدون محفظه بیشتر است. زیرا مقیاس زمانی واکنش شیمیایی بزرگتر شده و به امواج آکوستیکی فرصت کافی برای اثرگذاری روی نرخ آزادسازی حرارت شعله را می‌دهد [۸]. در شعله پیچشی نیز همین پدیده قابل رویت است. با این تفاوت که طول شعله پیچشی تغییر چندانی ندارد. لذا بجای طول شعله باید طول مرکز سطح آزادسازی حرارت در نظر گرفته شود. در شعله پیچشی نیز اندازه تابع پاسخ شعله در حالت محصور بیشتر از شعله نامحصور است [۹].

در مطالعه شعله M شکل مشاهده شد که با کاهش قطر محفظه لبه‌های شعله M شکل در مجاورت دیواره دچار خاموشی محلی می‌شود. این امر سبب کاهش سطح شعله و نرخ آزادسازی حرارت شعله می‌شود و در نتیجه در این نوع شعله، در تابع پاسخ شعله دیواره نقش میرا کننده (damping) دارد [۱۰].



شکل ۱- آزمونگر شعله بنسون با تحریک آکوستیک

در این پژوهش پدیده خاموشی شعله در مواجهه با امواج آکوستیکی در یک شعله پیش‌مخلوط بنسون مطالعه شده است. این کار در گستره‌ای

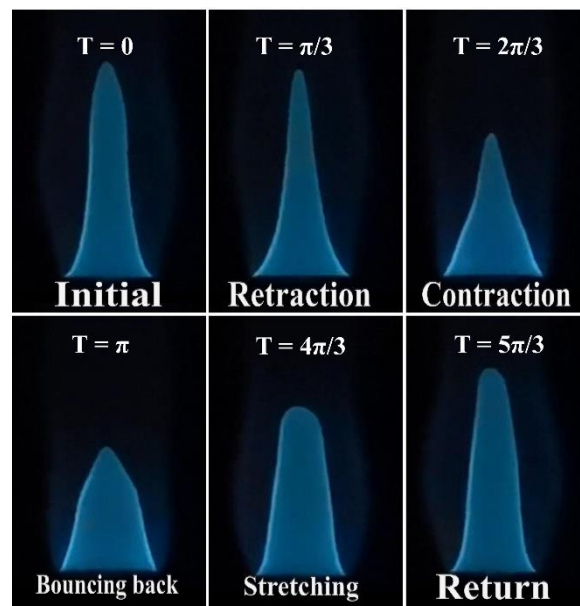
تفکیک 5 L/min و برای اندازه‌گیری دبی سوخت از روماتر *Nippon SPO4* با تفکیک 100 L/h استفاده شده است. در شکل ۲ مدار هیدرولیکی آزمون و مدار الکتریکی تحریک شعله مشاهده می‌شود.

۳- نتایج آزمون

۱-۳ خاموشی محلی

به منظور بررسی پدیده خاموشی محلی آکوستیک، یک شعله متان/هوا با نسبت هم‌ارزی $\varphi = 1.09$ و $\bar{V} = 0.62 \text{ m/s}$ در محدوده فرکانسی $20-100 \text{ Hz}$ با دامنه فشار ثابت $P' = 5 \text{ Pa}$ (معادل دامنه سرعت $V' = 1.1 \text{ cm/s}$) تحریک شد. شکل ۳ ساختار شعله بنسون تحریک شده با فرکانس 20 Hz را در یک دوره تناوب نشان می‌دهد. با برخورد موج آکوستیکی به جبهه شعله ابتدا شعله دچار کاهش طول (Retraction) و سطح می‌شود. این کاهش طول سبب نازک شدن ناحیه نزدیک به نوک شعله و ضخیم شدن ناحیه مجاور ریشه (Contraction) شعله می‌شود. در این شرایط نازک شدگی شعله در حدی نیست که بتواند شعله را تکه کند یا به صورت محلی خاموش کند. پس از گذشت نیمی از دوره تناوب ($T = \pi$) شعله به کمترین طول خود رسیده و سپس دوباره افزایش طول و سطح پیدا می‌کند (Bouncing Back) تا به شرایط اولیه بازگردد.

شکل ۴ همان شعله بنسون ($\varphi = 1.09$, $\bar{V} = 0.62 \text{ m/s}$) را در فرکانس تحریک 80 Hz نشان می‌دهد. با افزایش فرکانس (کاهش طول موج آکوستیکی) مشاهده می‌شود که سطح شعله به صورت چروکیده (wrinkled) در می‌آید. تشکیل این چروکیدگی‌های سطح شعله سبب می‌شود تا در فرآیند نازک شدن شعله (Necking)، جدایش سطح شعله پدید آید. در نتیجه این جدایش یک بخش از شعله کنده شده (Fragmentation) و به سمت پایین دست حرکت می‌کند. با حرکت تکه مجزای شعله به سمت پایین دست سطح آن کاهش یافته و به تدریج خاموش می‌شود. در نهایت شعله به طول اولیه خود بازمی‌گردد (Return).



شکل ۳ - تحریک آکوستیکی شعله بنسون متان/هوا در فرکانس 20 Hz ($V' = 1.1 \text{ cm/s}$ و $\bar{V} = 0.62 \text{ m/s}$, $\varphi = 1.09$)

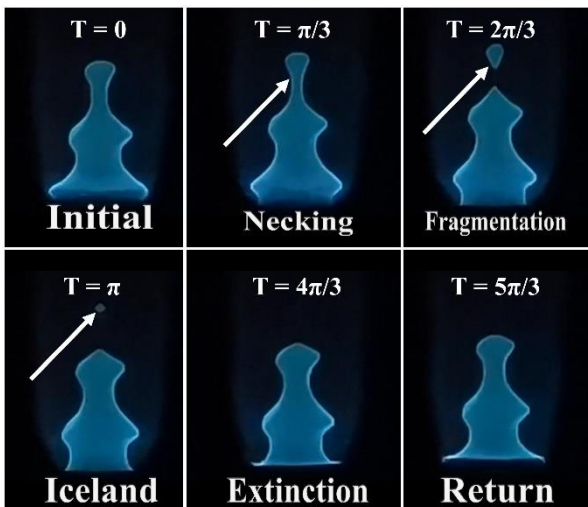
۲-۳ نسبت هم‌ارزی

در شکل ۵ نمودار فشار آکوستیکی خاموشی شعله بنسون متان/هوا در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف در گستره فرکانس $20-120 \text{ Hz}$ رسم شده است. در چنین حالتی شعله دچار خاموشی کامل یا Blow off می‌شود. همانند شعله‌های نفوذی با افزایش فرکانس، دامنه فشار آکوستیکی امواج لازم برای خاموشی شعله پیش‌آمخته بنسون نیز افزایش می‌یابد [۷]. در شعله‌های نفوذی مقیاس زمانی اختلاط کنترل‌کننده واکنش شیمیایی است. یعنی در صورتی زمان کافی برای اختلاط سوخت و هوا در دسترس باشد، واکنش شیمیایی انجام خواهد شد. اما در شعله پیش‌مخلوط اختلاط کامل انجام شده است و نیازی به بررسی زمان اختلاط نیست. با افزایش فرکانس (کاهش دوره تناوب و طول موج)، مقیاس زمانی آکوستیکی نسبت به مقیاس زمانی واکنش شیمیایی کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه برای اینکه شعله خاموش شود، نیاز است دامنه امواج آکوستیکی افزایش یابد تا کم شدن مقیاس زمانی امواج آکوستیک را جبران کند.

لیوون (Lieuwen) [۱۱] پیشنهاد کرده است که نرخ آزادسازی حرارت با معادله (۴) توصیف شود.

$$\dot{Q} = \int \rho S_L h_R dA \quad (4)$$

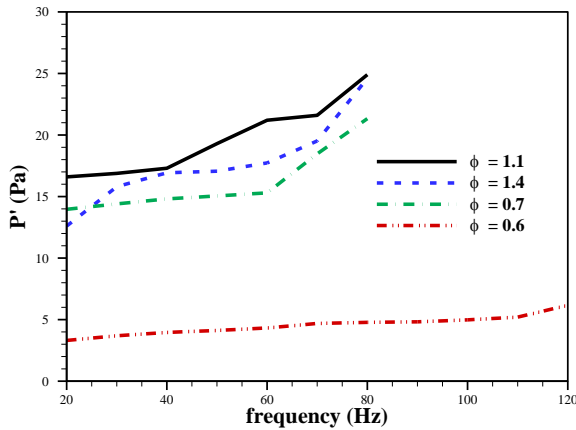
که در آن ρ چگالی واکنش‌دهنده‌ها، h_R آنتالپی واکنش شیمیایی و A سطح شعله است. S_L و h_R تابع نسبت هم‌ارزی φ است. شکل ۶ نمودار تغییرات سرعت شعله و آنتالپی واکنش شیمیایی متان/هوا را تابعی از نسبت هم‌ارزی نمایش می‌دهد. این نمودار بیان می‌کند نرخ تغییرات سرعت شعله و آنتالپی واکنش در نسبت هم‌ارزی $1 < \varphi < 1.1$ و شرایط رقیق از سوخت (Lean) حساسیت بیشتری نسبت به سایر نسبت هم‌ارزی‌ها دارد. در نسبت هم‌ارزی $1.0 < \varphi < 1.1$ شیب تغییرات هر دو کمیت در حالت کمینه است. لذا در چنین شرایطی پایداری شعله نسبت به اغتشاشات نسبت هم‌ارزی بیشینه است و دامنه امواج آکوستیکی لازم جهت خاموش کردن شعله بیشینه خواهد بود.



شکل ۴ - تحریک آکوستیکی شعله بنسون متان/هوا در فرکانس 80 Hz ($V' = 1.1 \text{ cm/s}$ و $\bar{V} = 0.62 \text{ m/s}$, $\varphi = 1.09$)

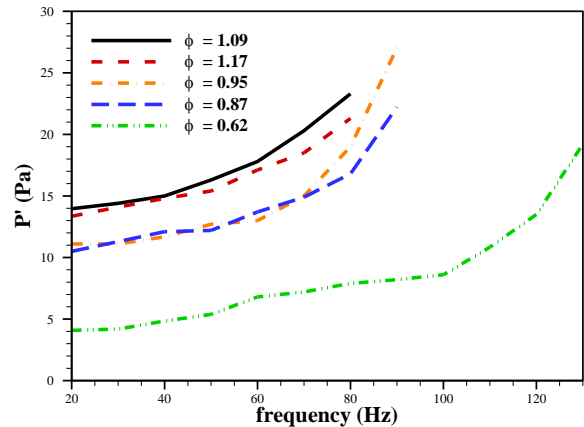
مقایسه با شعله متان نیاز به تولید امواج آکوستیکی با دامنه بزرگتر باشد (شکل ۹).

برای بررسی اثر نسبت هم‌ارزی بر نرخ آزادسازی حرارت شعله بنسون، از روش نورتایی شیمیایی رادیکال CH^* (chemiluminescence) شعله پروپان بهره گرفته شد. مجموع ۱۰ تصویر میانگین‌گیری شده با فیلتر اپتیکی میان‌گذر $430 \pm 5 \text{ nm}$ پس از پردازش تصویر به صورت کانتور شدت

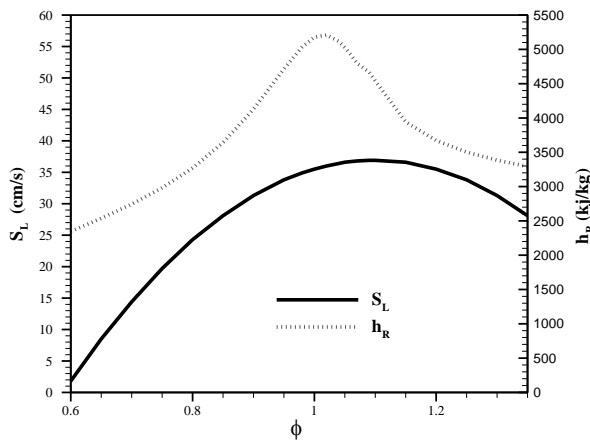


شکل ۷ - نمودار فشار آکوستیکی خاموشی شعله پروپان در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف

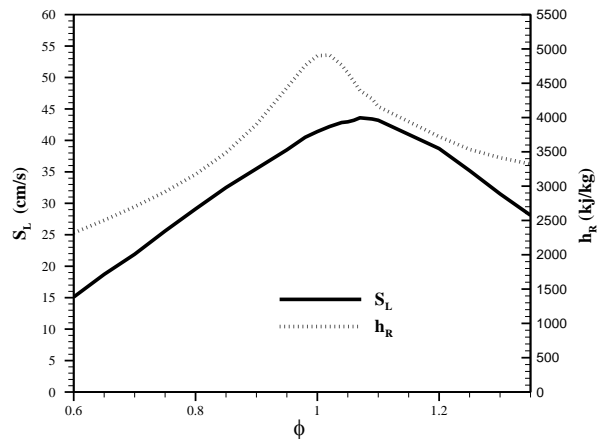
در شرایط $\phi > 1.1$ حساسیت سرعت شعله و آنتالپی واکنش به تغییرات نسبت هم‌ارزی دوباره افزایش پیدا می‌کند. اما شیب این تغییرات در حالت غنی از سوخت (Rich) کمتر از حالت رقیق است. لذا در نمودار شکل ۵ مشاهده می‌شود که بیشترین دامنه امواج آکوستیکی خاموشی متعلق به نسبت هم‌ارزی $\phi = 1.09$ است. شعله غنی از سوخت $\phi = 1.17$ درست نزدیک به شعله قبلی است و شعله‌های رقیق‌تر پایداری کمتری در برابر امواج آکوستیکی از خود نشان دادند.



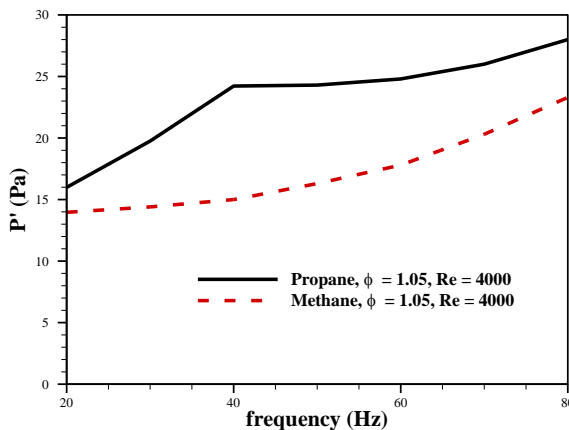
شکل ۵ - نمودار فشار آکوستیکی خاموشی شعله متان در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف



شکل ۸ - نمودار سرعت شعله و آنتالپی واکنش پروپان/هوا



شکل ۶ - نمودار سرعت شعله و آنتالپی واکنش متان/هوا



شکل ۹ - نمودار اثر نوع سوخت بر دامنه امواج آکوستیکی خاموشی

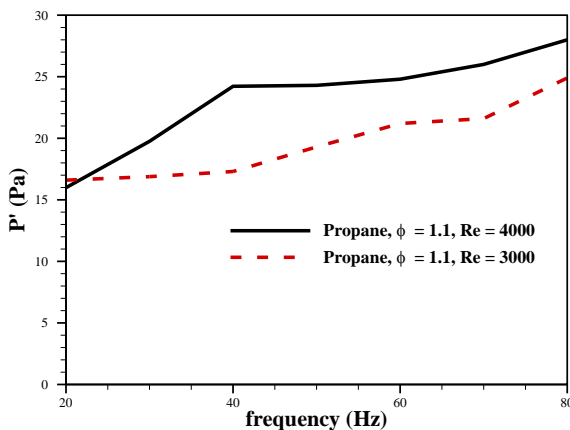
۳-۳ نوع سوخت

به منظور مطالعه اثر نوع سوخت در خاموشی شعله در مواجهه با امواج آکوستیکی، از گاز پروپان به عنوان سوخت شعله پیش‌آمیخته بنسون استفاده شد. در شکل ۷ نمودار دامنه فشار آکوستیکی لازم برای خاموشی شعله پروپان/هوا در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف ترسیم شده است. رفتار کلی نمودار خاموشی آکوستیکی شعله بنسون پروپان/هوا شباهت زیادی به شعله متان/هوا دارد. با این تفاوت که به ازای نسبت هم‌ارزی برابر، پایداری شعله پروپان در برابر شعله متان بیشتر است. زیرا سرعت شعله پروپان در نسبت هم‌ارزی $\phi = 1.1$ کمتر از شعله متان در همین نسبت هم‌ارزی است. لذا مقیاس زمانی واکنش شیمیایی شعله پروپان بیشتر از شعله متان است. افزایش مقیاس زمانی واکنش شیمیایی شعله پروپان سبب می‌شود که در

تابش رادیکال CH^* استخراج شد. در شکل ۱۰ توزیع شدت تابش رادیکال CH^* در نسبت هم‌ارزی $\phi = 1.4$ مشاهده می‌شود. مشخص است که بخش قابل توجهی از نرخ آزادسازی حرارت متعلق به ریشه (root) شعله است و سهم ناحیه نوک شعله به مراتب کمتر است. در شکل ۱۱ شدت تابش رادیکال CH^* در نسبت هم‌ارزی $\phi = 1.1$ مشاهده می‌شود. در این نسبت هم‌ارزی شدت تابش رادیکال CH^* بیشینه است و در نتیجه نرخ آزادسازی حرارت نیز بیشینه است. این امر سبب می‌شود تا در نسبت هم‌ارزی $\phi = 1.1$ دامنه امواج لازم برای خاموشی شعله پیش‌مخلوط بنسوز پروپان/هوا بیشترین مقدار را داشته باشد. با کاهش نسبت هم‌ارزی به مقدار $\phi = 0.7$ نرخ آزادسازی حرارت کاسته می‌شود و توان آکوستیکی امواج لازم برای خاموشی شعله بنسوز خواهد یافت (شکل ۱۲).

۳-۴ اثر افزایش دبی

در شکل ۱۳ نمودار اثر افزایش دبی بر دامنه امواج آکوستیکی لازم برای خاموشی شعله بنسوز پروپان/هوا در نسبت هم‌ارزی $\phi = 1.1$ رسم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دبی، دامنه امواج آکوستیکی خاموشی افزایش یافته است. نخست توجه شود که این افزایش دبی در محدوده پایداری شعله پروپان/هوا بوده و شعله به مرزهای Blow off نزدیک نیست.



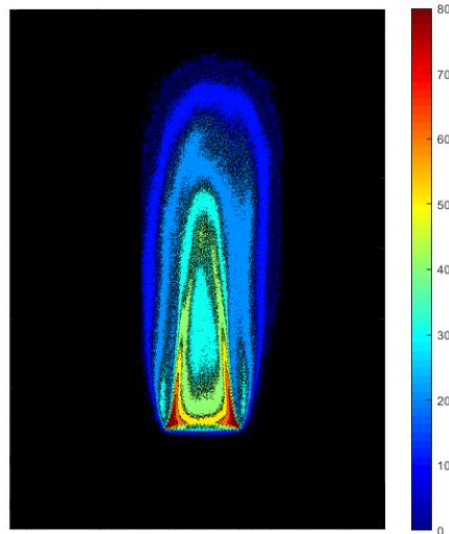
شکل ۱۳ - نمودار مقایسه اثر افزایش دبی بر دامنه امواج

آکوستیکی خاموشی شعله پروپان/هوا

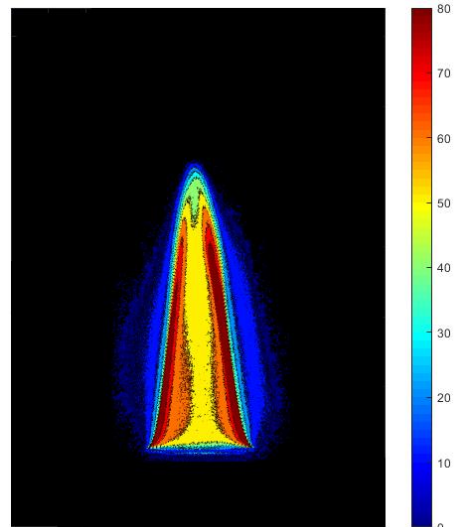
در چنین شرایطی با افزایش دبی در نسبت هم‌ارزی ثابت، طول شعله و سطح شعله افزایش می‌یابد. بنابراین مقدار نرخ آزادسازی حرارت شعله (معادله (۴)) افزایش خواهد یافت. در نتیجه انرژی آکوستیکی لازم برای خاموش‌سازی شعله نیز افزایش خواهد داشت. انرژی آکوستیکی امواج با معادله (۵) بیان می‌شود.

$$E = \frac{1}{2} \bar{\rho} u'^2 + \frac{1}{2} \frac{p'^2}{\bar{\rho} c^2} \quad (5)$$

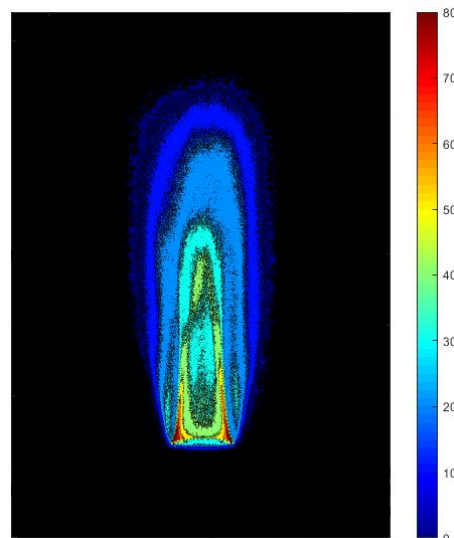
که در آن $\bar{\rho}$ چگالی میانگین جریان، u' اغتشاشات سرعت آکوستیکی و c سرعت صوت در جریان پیش‌مخلوط پروپان/هوا است. طبق معادله انرژی آکوستیکی امواج (۵) برای افزایش انرژی آکوستیکی امواج باید دامنه اغتشاشات فشاری آکوستیکی را افزایش داد. اثر فوق در شعله نفوذی نیز با همین استدلال مشاهده شده است [۷].



شکل ۱۰ - شدت تابش CH^* شعله پروپان $\phi = 1.4$



شکل ۱۱ - شدت تابش CH^* شعله پروپان $\phi = 1.1$



شکل ۱۲ - شدت تابش CH^* شعله پروپان $\phi = 0.7$

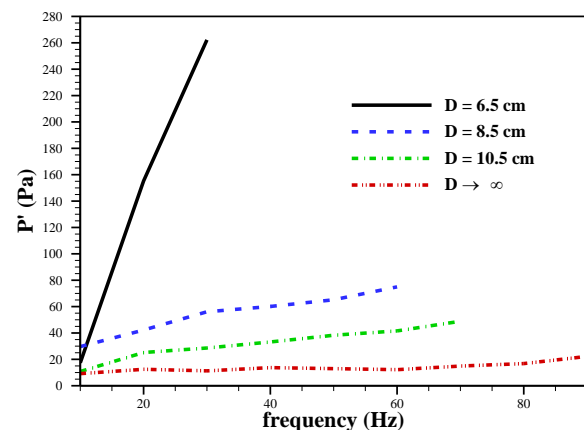
در صورتی که شعله به صورت محصور در آید، با کاهش قطر دیواره، طول و سطح شعله افزایش می‌یابد. افزایش این دو پارامتر منجر به افزایش نرخ آزادسازی حرارت خواهد شد و لذا با کاهش قطر محفظه، پایداری آن در برابر امواج آکوستیکی افزایش یافت.

۵- مراجع

- [1] R. Zong, R. Kang, C. Liu, Z. Zhang, and Y. Zhi, "Analysis of Flame Extinguishment and Height in Low Frequency Acoustically Excited Methane Jet Diffusion Flame", *Microgravity-Science and Technology*, January 2018.
- [2] T.C. Lieuwen, and V. Yang, "Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling", *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Arlington, Texas, Vol. 210, 2005, pp. 13-15.
- [3] K. Takita, H. Yamazaki, T. Uchida, and G. Masuya, "Extinction Karlovitz Numbers of Premixed Counterflow Flames under Various Pressures", *Combustion Science and Technology*, Vol. 178, 2006, pp. 1649-1668.
- [4] S. H. Chung, D. H. Chung, C. Fu, and P. Cho, "Local Extinction Karlovitz Number for Premixed Flames", *Combustion and Flame*, Vol. 106, 1996, pp. 515-520.
- [5] T. M. Vu, M. S. Cha, B. J. Lee, and S. H. Chung, "Tip opening of premixed bunsen flames: Extinction with negative stretch and local Karlovitz number", *Combustion and Flame*, Vol. 162, 2015, pp. 1614-1620.
- [6] Y. Sun, M. Sun, J. Zhu, Y. Xie, H. Wang, and M. Wan, "The Local Extinction and the Nonlinear Behaviors of a Premixed Methane/Air Flame under Low-Frequency Acoustic Excitation", *Modern Physics Letters*, 2050138, 2020.
- [7] P. Niegodajew, K. Lukasiak, H. Radomiak, D. Musiała, M. Zajemska, A. Poskart, and K. Gruszka, "Application of Acoustic Oscillations in Quenching of Gas Burner Flame", *Combustion and Flame*, Vol. 194, 2018, pp. 245-249.
- [8] A. Cuquel, D. Durox, and T. Schuller, "Scaling the Flame Transfer Function of Confined Premixed Conical Flames", in *2013 Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 34, 2013, pp. 1007-1014.
- [9] A. J. De Rosa, S. J. Peluso, B. D. Quay, and D. A. Santavicca, "The Effect of Confinement on the Structure and Dynamic Response of Lean-Premixed, Swirl-Stabilized Flames", in *2016 Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 138, 2016.
- [10] A.L. Birbaud, D. Durox, S. Ducruix, and S. Candel, "Dynamics of Confined Premixed Flames Submitted to Upstream Acoustic Modulations", in *2007 Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, 2007, pp. 1257-1265.
- [11] S. Krishna, S. Hemchandra, and T. Lieuwen, "Premixed Flame Response to Equivalence Ratio Perturbations", *Combustion Theory and Modelling*, Vol. 14, No. 5, 2010, pp. 681-714.

۳- اثرات دیواره

برای مطالعه اثر دیواره، شعله پیش مخلوط متان/هوا در نسبت هم‌ارزی ثابت $\phi = 0.87$ استفاده شده است. چهار نوع آزمون با شرایط ذکر شده در جدول ۱ انجام شد. نتایج حاصل در نمودار شکل ۱۴ ترسیم شده است. با افزودن دیواره و کاهش قطر آن، انتقال حرارت شعله با دیواره منجر به انبساط ناقص گازهای فرآورده احتراق خواهد شد [۸]. در چنین شرایطی به علت شتابگیری گازهای فرآورده در محفظه، طول شعله و سطح آن افزایش خواهد یافت. با افزایش سطح شعله در نسبت هم‌ارزی ثابت، نرخ آزادسازی حرارت افزایش خواهد یافت (معادله (۴)). در چنین شرایطی انرژی آکوستیکی لازم برای خاموشی شعله افزایش خواهد داشت.



شکل ۱۴ - اثر تغییر قطر دیواره محفظه بر دامنه امواج آکوستیکی لازم برای خاموشی شعله متان/هوا

نمودار همچنین نشان می‌دهد در صورتی که قطر محفظه آنقدر کاهش یابد که شعله در هنگام تحریک با دیواره محفظه تماس پیدا کند، انرژی آکوستیکی لازم برای خاموش‌سازی شعله بشدت افزایش خواهد داشت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با کاهش قطر محفظه پایداری شعله افزایش چشمگیری خواهد داشت.

۴- نتیجه‌گیری

خاموشی شعله پیش‌آمیخته بنسون با امواج آکوستیکی برای سوخت‌های متان و پروپان به روش تجربی بررسی شده است. نتایج برای هر دو سوخت نشان داد که

- با افزایش فرکانس امواج فشاری آکوستیکی دامنه اغتشاشات لازم برای خاموش‌سازی شعله افزایش خواهد یافت.
- نسبت هم‌ارزی شعله تاثیر زیادی بر دامنه امواج آکوستیکی لازم برای خاموش‌سازی شعله دارد. برای شعله پیش‌مخلوط متان/هوا در نسبت هم‌ارزی $\phi = 1.09$ پایداری شعله در برابر امواج آکوستیکی در مقایسه با سایر نسبت هم‌ارزی‌ها بیشینه است. این مقدار برای سوخت پروپان در نسبت هم‌ارزی $\phi = 1.04$ رخ می‌دهد.

افزایش دبی جریان پیش‌آمیخته سوخت/هوا در نسبت هم‌ارزی ثابت منجر به افزایش طول و سطح شعله خواهد شد و نرخ آزادسازی حرارت را افزایش خواهد داد. در چنین شرایط انرژی امواج آکوستیکی لازم برای خاموش‌سازی شعله افزایش خواهد داشت.