

تحلیل پاسخ شعله پیش مخلوط V-شکل به تحریک آکوستیکی

نگار نباتیان^۱، محمد فرشچی^۲

دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا

Negar.nabatian@gmail.com

چکیده

تحقیق حاضر، مطالعه تجربی پاسخ شعله پیش مخلوط آرام V-شکل و M-شکل به تحریکات آکوستیکی است. محفظه‌های احتراقی که مجهز به مشعلهای V-شکل هستند نسبت به ناپایداریهای احتراق حساس می‌باشند. این مشعلها در توربین‌های گازی و پس‌سوز توربینهای هوایی استفاده می‌شوند. شعله‌های V-شکل به علت اینکه همانند شعله‌های مخروطی به لبه لوله مخلوط گاز متصل نیستند، نسبت به نوسانات جریان بالادست در بازه خاصی از فرکانسها حساس می‌باشند و همانند آمپلی‌فایر عمل می‌کنند. در کار حاضر شعله‌های پیش مخلوط پروپان و هوا V-شکل و M-شکل در روی میله مرکزی و لبه مشعل پایدار می‌شوند. ابتدا، محدوده نسبت تعادل برای شعله V-شکل و M-شکل پایدار بدست آمده و سپس شعله توسط امواج آکوستیکی تولید شده با بلندگویی که در بالادست جریان نصب شده در یک بازه فرکانسی تحریک می‌شود. نوسانات سطح شعله که به صورت موج‌دار شدن سطح آن ظاهر می‌شوند، توسط دوربین سرعت بالا عکسبرداری شده و نوسانات فشار با میکروفنی که در پایین دست جریان قرار دارد ضبط شده است. با استفاده از پردازش تصویر نرم‌افزار MATLAB دامنه و فاز پاسخ شعله تحریک شده محاسبه می‌شود. همچنین تغییرات شکل شعله و شدت نور آن در یک دوره تناوب برای فرکانسها، دی‌ها و نسبت تعادل‌های مختلف ارائه شده است. براساس نتایج بدست آمده میدان آکوستیکی، نوسانات سرعت و گردابه‌ها نقش مهمی در پاسخ شعله دارند. تابع تبدیل بدست آمده پیش‌بینی شرایط ناپایداری محفظه احتراق را امکان پذیر مینماید. همچنین بررسی رفتار شعله در یک دوره تناوب نشان می‌دهد که بیشترین نوسانات حرارت ناشی از نوسانات سرعت در چه فازی اتفاق می‌افتد و تاثیر پارامترهای غیرخطی در پاسخ شعله مشخص می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شعله پیش مخلوط آرام V-شکل، شعله پیش مخلوط آرام M-شکل، تابع تبدیل

۱- مقدمه

محفظه‌های پیش مخلوط رقیق در توربینهای گازی با پایین آوردن دمای شعله باعث کاهش میزان NOx می‌شوند. این محفظه‌ها نسبت به ناپایداریهای احتراق که ناشی از رشد نوسانات فشار داخل محفظه که منجر به احتراق ناپایدار با تولید صدا، ارتعاش مکانیکی و تخریب سازه محفظه می‌شود، حساس می‌باشند. مکانیسم اصلی ناپایداریها به علت کوپل شدن مدهای آکوستیکی محفظه و حرارت آزاد شده از شعله می‌باشد. نوسانات فشار باعث نوسانات حرارت آزاد شده شعله می‌شود که این نوسانات در یک سیکل به نوبه خود باعث نوسانات فشار می‌شوند.

^۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد

^۲ - استاد دانشکده مهندسی هوافضا

برای از بین بردن ناپایداریهای مراحل مختلف موتور باید درک درستی از مکانیزم حاکم بر ایجاد آنها داشته باشیم. مطالعات زیادی در مورد اثر فرکانس، شکل شعله و نوسانات جریان بر روی رفتار خطی و غیرخطی شعله صورت گرفته است. شولر^۱ و کندل^۲ ناپایداریهای خودالقایی شعله پیش مخلوط آرام را مورد مطالعه قرار دادند و روشی برای مشخص کردن نقاط پایداری بر اساس پاسخ شعله نسبت به نوسانات جریان بدست آوردند. نتایج نشان داد که به هنگام از بین رفتن سطح شعله در اثر واکنش المانهای مجاور به علت وجود گردابه، پالس فشاری ایجاد می شود که در صورت همفاز شدن با آکوستیک محفظه باعث تشدید می شود [۱]. همچنین، کندل و بیرباد^۳ پاسخ شعله مخروطی را نسبت به نوسانات آکوستیکی به صورت تجربی بررسی کردند و دامنه و اختلاف فاز بین سیگنال تحریک و سیگنال نوسانات حرارت آزاد شده را محاسبه کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که پاسخ شعله به سه پارامتر عدد استروهال، قطر محفظه و سرعت جریان بستگی دارد [۲].

نوسانات حرارت آزاد شده از جمله عوامل ایجاد ناپایداری است که خود ناشی از عوامل مختلفی از جمله نوسانات سرعت، از بین رفتن محلی و کلی سطح شعله، احتراق مجدد، حساسیت نرخ سوزش به نوسانات فشار، شرایط مرزی غیرخطی، برهم کنش با دیوارهای محفظه، نوسانات نسبت تعادل و سینماتیک شعله موثر هستند. خاموشی و احتراق مجدد ناحیه ای شعله باعث تغییر غیرخطی دامنه نوسانات حرارت آزاد شده با سرعت می شود [۳].

نرخ حرارت آزاد شده از سطح یک شعله پیش مخلوط از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$q(t) = \int_{A(t)} \rho_u S_L(t) h_R(t) dA(t), \quad (1)$$

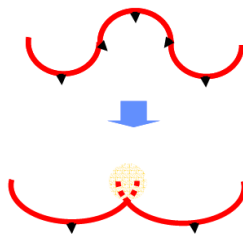
که در آن ρ_u چگالی مخلوط گاز، S_L سرعت شعله، h_R حرارت حاصل از واکنش و A سطح شعله می باشند. اندیس u نشانگر مواد نسوخته می باشد و انتگرال بر روی کل سطح شعله گرفته می شود. از رابطه (۱) مشاهده می شود که نوسانات حرارت آزاد شده از برهم کنش نوسانات سطح شعله، نرخ سوخت مواد و حرارت حاصل از واکنش بدست می آید. به منظور بررسی اثر نوسانات سرعت بر روی پاسخ شعله، h_R و چگالی مخلوط ثابت فرض می شوند. نوسانات در سرعت سوختن مواد باعث ایجاد نوسان در محل شعله شده که خود باعث تحریک امواج با طول موج انتقالی $\lambda_{convective}$ عبوری از سطح شعله شده و سطح شعله را چروک می کنند. این امر باعث نوسان سطح شعله می شود که نتیجه آن نوسان در نرخ حرارت آزاد شده است. طول شعله L با طول موج نوسانات سرعت u' که ناشی از موجهای فشاری طولی می باشد، مقایسه می شود. اگر طول شعله کمتر از طول موج نوسان آکوستیکی باشد کل شعله به صورت یکپارچه بالا و پایین می رود و نوسان هارمونیک دارد. اگر طول شعله بیشتر از طول موج نوسان آکوستیکی باشد، نوسانات انتقالی در سطح شعله انتشار می یابند.

در بررسی دینامیک شعله عوامل موثر بر پاسخ غیرخطی آن مدنظر قرار می گیرد. در شکل (۱) شعله با نوسان گذرا تحریک می شود که باعث چروکیدگی شدن شعله می شود، اما با گذشت زمان به حالت تخت خود بازمی گردد. بنابراین، فرآیند سینماتیکی باعث از بین رفتن سطح شعله می شود. نرخ از بین رفتن سطح شعله بسته به دامنه و طول موج نوسانات سطح شعله دارد.

¹ Schuller

² Candel

³ Birbaud



شکل ۱- طرح شعله چروکیده شده (بالا) و چگونگی از بین رفتن سطح شعله طی پروسه سینماتیکی [۴]

چروکهایی با دامنه بالا سریعتر از چروکهایی با دامنه پایین تخت می‌شوند. همچنین چروکهایی با طول موج کوتاهتر سریعتر از طول موجهای بلندتر تخت می‌شوند. همانطور که گفته شد این عامل باعث افزایش پاسخ غیرخطی در فرکانسهای بالاتر که طول موجهای کوتاهتری دارند، می‌باشد. علاوه بر میدان جریان، میدان نوسانات هم در پاسخ شعله موثر می‌باشند. میدان سرعت به دو بخش غیر چرخشی تراکم‌پذیر (میدان آکوستیکی) و چرخشی تقسیم می‌شود. در جریان همگن، نوسانات چرخشی با سرعت جریان حجمی انتقال می‌یابند. خصوصیت‌های آکوستیکی با طول موج آکوستیکی $\lambda_a = c/f$ تغییر می‌کنند. در حالیکه نوسانات چرخشی با طول موج انتقالی $\lambda_c = u_0/f$ تغییر می‌کنند و با سرعت جریان انتقال می‌یابند. بنابراین در میدانهایی با عدد ماخ پایین، طبق رابطه $\lambda_c/\lambda_a = u_0/c = M$ طول موج مد چرخشی کوتاهتر از طول موج آکوستیکی با نسبت برابر با عدد ماخ جریان می‌باشد و نرخ رشد ناپایداریها به شدت تحت تاثیر دامنه و فرکانس امواج آکوستیکی حاصل از ناپایداریها قرار می‌گیرد. برای دامنه‌های بالاتر، چروکیدگیهای بزرگتری در سطح شعله توسعه می‌یابند که با سرعت جریان انتشار پیدا میکنند. این چروکیدگیهای سطح شعله میدان آکوستیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهند و باعث تغییر ماهیت میدان از حالت همگن به حالت انتقالی ناهمگن و در نتیجه رفتار غیرخطی شعله می‌شوند [۴].

در کار حاضر به بررسی اثر نوسانات آکوستیکی بر پاسخ شعله V-شکل و M-شکل برای شناخت رفتار مشعلهای مختلف صنعتی و شعله‌های درون محفظه احتراق و پس‌سوزهای توربینی پرداخته شده است. ابتدا با استفاده از تئوری حاکم بر شعله‌های پیش‌مخلوط برای هندسه شعله‌های V-شکل، پارامترهای موثر در تابع تبدیل استخراج می‌شود. سپس تستهای مورد نیاز توسط مشعل آزمایشگاهی ساخته شده برای بررسی اثر پارامترها در رفتار شعله انجام می‌شود.

۲- نتایج تجربی

ابتدا شرح سیستم آزمایشگاهی و طراحی جدول تستها آورده شده است. در ادامه داده‌های اندازه‌گیری شده و نحوه پردازش آن ارائه شده است.

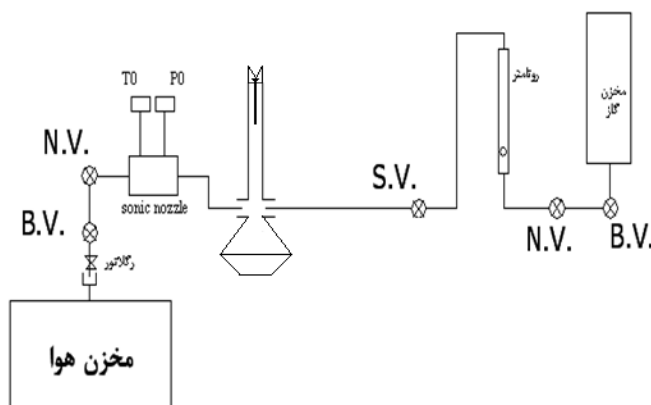
۱-۲- شرح سیستم آزمایشگاهی

همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود هوا از کمپرسور وارد رگلاتور^۱ برای تنظیم فشار خط هوا شده و بعد از آن وارد خط هوا می‌شود و به وسیله شیر توپی^۲ جریان آن قطع و وصل می‌گردد. پس از عبور از شیر توپی به وسیله یک شیر

^۱ regulator

^۲ Ball valve

سوزنی^۱ مقدار دبی عبوری کنترل می گردد سپس هوا با عبور از شیپوره صوتی، برای اندازه گیری دبی آن، وارد لوله مشعل احتراق می شود. سوخت نیز با عبور از شیر توپی، که برای قطع و وصل جریان بکار می رود، وارد شیر سوزنی شده و به وسیله این شیر دبی آن کنترل می گردد. پس از این شیر روتامتر سر راه جریان قرار دارد که به وسیله آن مقدار دبی سوخت اندازه گیری می شود. البته روتامتر وسیله اندازه گیری دبی مناسبی نیست (نسبت به شیپوره صوتی) اما با توجه به اینکه فشار در قبل و بعد از روتامتر ثابت است نمی توان از وسایل اندازه گیری چون شیپوره صوتی استفاده کرد. جریان پس از عبور از روتامتر وارد لوله احتراق می گردد. جریان هوا و سوخت با زاویه ۱۸۰ درجه با یکدیگر برخورد می کنند و جریان پیش مخلوط ایجاد می کنند. در نهایت از لوله مشعل عبور کرده و محترق می گردد.



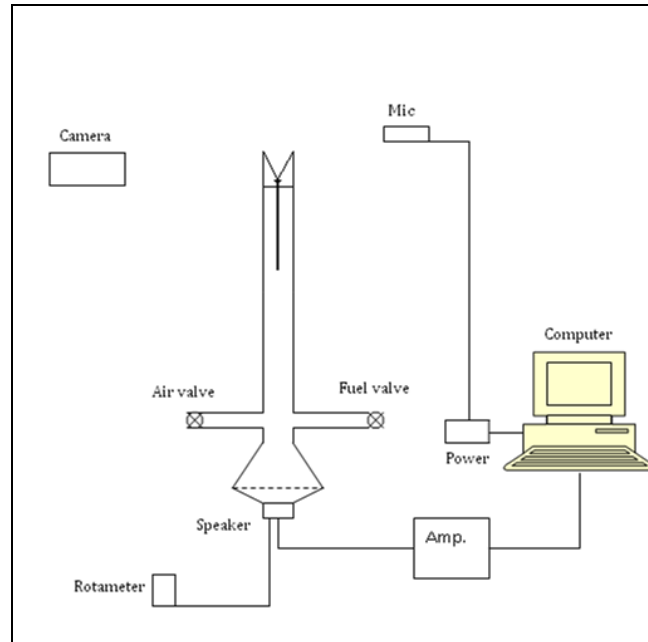
شکل ۲- شکل شماتیک دستگاه

لوله مشعل، یک لوله استوانه ای به طول ۲۰ سانتیمتر و با قطر خارجی ۲۲ میلیمتر می باشد که یک میله مرکزی با قطر ۶ میلیمتر و با سر پخ به قطر ۸ میلیمتر به محور لوله متصل شده است. سر میله به اندازه ۴ میلیمتر بالاتر از لوله قرار دارد. میله به طول ۱۰ سانتیمتر در وسط لوله توسط دو عدد پیچ با فاصله ۱ سانتیمتر و به صورت عمود برهم به لوله متصل شده است که با تنظیم پیچها می توان میله را کاملا در مرکز قرار داد. در مسیر سه لایه توری در پایین و یک لایه توری در بالا برای از بین بردن اثر پیچها و آرام کردن جریان استفاده شده است. مشعل توسط سوخت پروپان و هوا تغذیه می شود. تستهای آکوستیکی انجام شده در بازه فرکانسی ۲۰۰-۴۰۰ هرتز می باشد که بازه موردنظر با توجه به ناحیه پاسخ خطی بلندگو و فرکانسهای طبیعی لوله مشعل انتخاب شده است.

۲-۲- اندازه گیری و پردازش داده ها

پس از تنظیم سوخت و هوا و بدست آوردن نسبت تعادل ϕ موردنظر، مطابق شکل (۳)، نوسانات آکوستیکی فشار توسط میکروفنی که در ۲۵ سانتیمتر از لبه مشعل و در ارتفاع ۵ سانتیمتر از سر آن قرار دارد گرفته شده و توسط نرم افزار کولادیت در کامپیوتر ضبط می شود. این فایل سپس توسط کد نوشته شده با نرم افزار MATLAB پردازش می شود. بنابراین با توجه به داده های سازمان یافته از خروجی MATLAB می توان فرکانس و دامنه موج غالب را بدست آورده و رسم کرد.

¹ Needle valve



شکل ۳- شماتیک از سیستم تحریک آکوستیکی و سیستم عکسبرداری

برای اندازه گیری نوسانات آزاد شدن حرارت از یک دوربین برای عکسبرداری با سرعت ۵۰۰ فریم بر ثانیه که در فاصله ۵۰ سانتیمتر از مشعل قرار گرفته، استفاده شده است. پردازش تصاویر بدست آمده از عکسبرداری، با کدی نوشته شده صورت می گیرد. منطق حاکم بر کد به این صورت است که ابتدا عکسهای بریده شده و بر حسب فرکانس تحریکی دوره تناوب بدست می آید. حال با در نظر داشتن سرعت داده برداری ۵۰۰ فریم بر ثانیه در هر ۰/۰۰۲ ثانیه یک عکس گرفته می شود. با تقسیم دوره تناوب بر این زمان تعداد تصاویر در یک سیکل بدست می آید. حال با تقسیم ۳۶۰ بر تعداد عکسها فاز مربوط به هر عکس مشخص می شود. سپس تصاویر همفاز برهم نهی شده و متوسط تصویر در آن فاز بدست می آید. در مرحله بعد با برهم نهی همه تصاویر بریده شده و مشخص کردن پیکسلهای روشن شدت نور مربوط به شعله بدست آمده و از آن FFT گرفته می شود. حال مشابه پردازش داده های صوتی، دامنه و فاز فرکانس غالب موج نوری مشخص شده و رسم می شود. همچنین برای اندازه گیری طول شعله با استفاده از نرم افزار MATLAB تعداد پیکسلهای قطر مشعل محاسبه شده و با دانستن قطر مشعل، طول هر پیکس بر حسب میلیمتر محاسبه شده است. سپس، طول تعداد پیکسلهای شعله در سه نقطه اندازه گیری شده و با میانگیری و ضرب آن در طول هر پیکسل، طول شعله محاسبه شده است.

۳-۲- طراحی ماتریس تستها

با توجه به معادله استویکیومتری برای مخلوط هوا-پروپان، نسبت هم ارزی ϕ_1 به صورت زیر تعریف می شود:

$$\phi_1 = \frac{\left(\frac{\text{Fuel}}{\text{Air}}\right)_{\text{actual}}}{\left(\frac{\text{Fuel}}{\text{Air}}\right)_{\text{stoich}}} = 23.8 \left(\frac{\text{Fuel}}{\text{Air}}\right)_{\text{actual}} = 23.8 \frac{Q_{\text{fuel}}}{Q_{\text{air}}}, \quad (2)$$

که در این رابطه Q_{fuel} ، جریان حجمی سوخت و Q_{air} ، جریان حجمی هوا می باشد. بدین ترتیب جدول تستها برای مشخص کردن محدوده شعله M و V طراحی شده است.

جدول ۱- جدول تستهای طراحی شده برای مشخص کردن محدوده شعله های M و V

P. Static(pascal)	Vol. rate air(L/min)	U(m/s)	V-M	$\Phi 1(M \rightarrow V)$	$\Phi 1(V \rightarrow M)$	$\Phi 1$ blow out	$\Phi 1$ lift off
۱۰۰۰	۱۸/۹۶۵	۰/۹	M	۱/۰۷-۱/۸۳	۱/۲-۲	۰/۷۵	
			V	۰/۸-۱/۰۵			
۲۰۰۰	۲۶/۱۹	۱/۲۵	M	۰/۹۵-۱/۵۸	۱/۳-۲	۰/۷۴	۰/۸
			V	۰/۷۵-۰/۹۲	۰/۸-۱/۳۵		
۳۰۰۰	۳۲/۳۵	۱/۵۴	M	۰/۹۵-۱/۵۸	۱/۴۲-۱/۵۸	۰/۷۵	۰/۸۵
			V	۰/۷۷-۰/۹۲	۰/۸-۱/۳۵		
۴۰۰۰	۳۶/۱۸	۱/۷۲	M	۱/۲۵-۱/۷۸	۱/۵۲-۱/۷۸	۰/۸	۰/۹
			V	۰/۸۵-۱/۲	۰/۸۶-۱/۴۹		

پس از بدست آوردن محدوده شعلهها برای سه $\Phi 1$ در چهار فرکانس و سه دبی مشخص تستهای آکوستیکی انجام شده است که در جدول (۲) آمده است:

جدول ۲- تستهای آکوستیکی انجام شده بر حسب فشار، فرکانس و نسبت تعادل مشخص شده

Test No.	P(pascal)	F(Hz)	$\Phi 1$
۱	۱۰۰۰	۴۰	۱/۲
۲	۱۰۰۰	۴۰	۱/۵
۳	۱۰۰۰	۱۰۰	۰/۹
۴	۱۰۰۰	۱۰۰	۱/۲
۵	۱۰۰۰	۱۰۰	۱/۵
۶	۱۰۰۰	۱۶۰	۱/۵
۷	۱۰۰۰	۱۹۰	۰/۹
۸	۱۰۰۰	۱۹۰	۱/۲
۹	۱۰۰۰	۱۹۰	۱/۵
۱۰	۲۰۰۰	۱۰۰	۱/۲
۱۱	۲۰۰۰	۱۰۰	۱/۵
۱۲	۲۰۰۰	۱۹۰	۱/۲
۱۳	۲۰۰۰	۱۹۰	۱/۵
۱۴	۳۰۰۰	۱۰۰	۰/۹
۱۵	۳۰۰۰	۱۹۰	۱/۲
۱۶	۳۰۰۰	۱۰۰	۱/۲

۳- تحلیل خطا

نرخ دبی جریان، فشار و سرعت ورودی نباید همزمان تغییر کند. با توجه به رابطه (۳) وابستگی فشار به نرخ دبی جریان ورودی باعث می‌شود که سرعت جریان مستقل از دبی تغییر کند. برای اینکه بتوان سرعت و فشار را مستقل از دبی تغییر داد، می‌توان از یک شیر برای تغییر مساحت ورودی استفاده کرد که به علت عدم دسترسی به آن میزان خطا تغییرات سرعت با تغییر فشار محاسبه شده است. در سری تستهای انجام شده، با تغییر دبی جریان از ۱۵/۱۹ به ۳۶/۱۸ لیتر بر دقیقه، فشار محفظه از ۱۰۰۰ به ۴۰۰۰ پاسکال تغییر می‌کند. حال با جاگذاری در رابطه (۳) مقادیر سرعت محاسبه شده است. با تغییر ۷۵ درصدی فشار، سرعت جریان مطابق رابطه (۳) ۵۰ درصد تغییر می‌کند. حال آنکه سرعت اندازه‌گیری شده توسط لوله پیتوت بدون وجود توری‌ها، میزان ۴۵ درصد تغییر در سرعت ورودی ناشی از تغییرات فشار را نشان می‌دهد. پس از قرار دادن توری‌ها میزان تغییرات سرعت ورودی اندازه‌گیری شده با لوله پیتوت در فشار ۱۰۰۰ برابر با ۰/۹ و در فشار ۴۰۰۰ برابر با ۱/۱ پاسکال است. بنابراین افزایش ۷۵ درصدی فشار باعث افزایش ۱۵ درصد سرعت ورودی می‌شود. بنابراین با تغییر فشار، میزان ۱۵ درصد خطا داریم که ناشی از تغییرات سرعت بوده و فرض ثابت بودن سرعت با تغییرات فشار کاملاً ارضا نمی‌شود.

$$\bar{u} = \frac{\dot{m}}{\rho A} = \frac{\dot{m}OR}{PA} \quad (3)$$

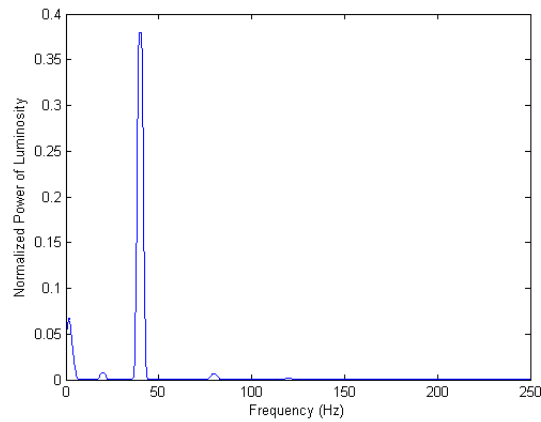
۴- بحث و بررسی

در این بخش ابتدا محدوده شعله M و V مشخص می‌شود و سپس، بخشی از نتایج حاصل از تستهای جدول (۲) و (۳) ارائه و به تحلیل آنها پرداخته شده است.

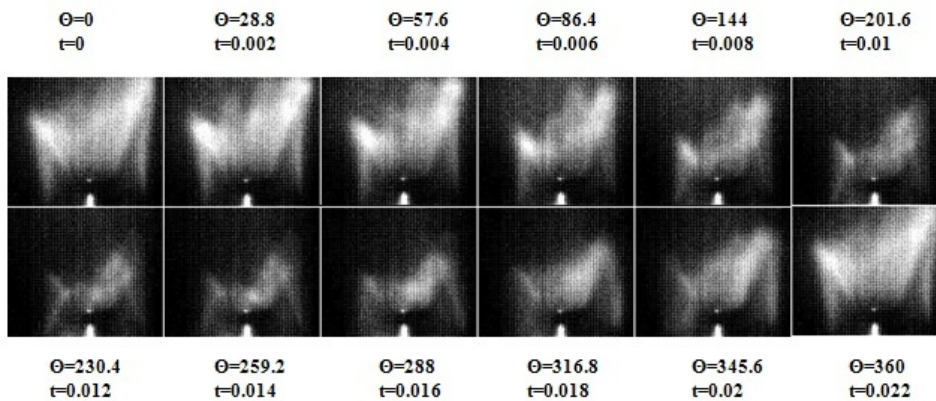
۴-۱- تستهای احتراق برای بدست آوردن محدوده شعله M و V

با توجه به جدول (۱) دو نکته قابل مشاهده است. نکته اول، تغییر نقطه گذر در تستهای مرحله اول با دوم است. در حالت دوم بیشتر محدوده به شعله‌های V شکل اختصاص دارد. در حالت اول شعله M کاملاً پایدار و آرام بوده و بتدریج با کاهش سوخت، سرعت شعله کاهش یافته و جریان از لبه‌ها جدا می‌شود. ولی در حالت دوم، با افزایش سوخت، سرعت شعله بیشتر شده و طول شعله نیز بلندتر می‌شود و سطح شعله افزایش می‌یابد. گردابه‌هایی که در پشت شعله قرار دارند از سر میله به بالا حرکت کرده و چون زمان بیشتری برای رشد کردن دارند لبه شعله را چروکیده کرده و شعله را آشفته می‌کنند. بنابراین شعله دیرتر از حالت V-شکل خارج شده و به M تبدیل می‌شود. نکته دوم، تغییر نقطه کنده شدن شعله از سر میله قبل از رسیدن به نقطه خاموشی است. با بالا بردن دبی که بیشتر متناسب با فشار هوا می‌باشد، شعله در نسبت تعادل بالاتری ناپایدار می‌شود. از آنجا که با افزایش دبی سرعت نیز افزایش می‌یابد، در نتیجه سرعت شعله در نسبت تعادل یکسان در مقایسه با حالت فشار کمتر دیگر نتوانسته بر اثر سرعت جریان غالب شود و سریعتر کنده می‌شود.

حال نتایج حاصل از تستهای آکوستیکی آورده شده است. نمونه نتایج برای حالت نسبت تعادل ۱/۲، فرکانس ۴۰ هرتز و سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه که شکل شعله M بیان می‌کند. طول شعله برای این حالت برابر با ۱۶/۸۲ میلیمتر محاسبه شد که با توجه به فرکانس ۴۰ هرتز و از آنجا که طول موج با معکوس فرکانس برابر است، طول موج ۲/۵ سانتیمتر می‌شود. حال با توجه به بخش (۱) چون طول موج بزرگتر از طول شعله است، کل شعله نوسان حجمی خواهد داشت. شکل (۴) نشان می‌دهد که شعله با وجود موجهای مختلف با موج غالبی که فرکانس تحریکی ۴۰ هرتز نوسان می‌کند. در شکل (۵) نوسان شعله M- شکل در یک دوره تناوب نشان داده شده است.

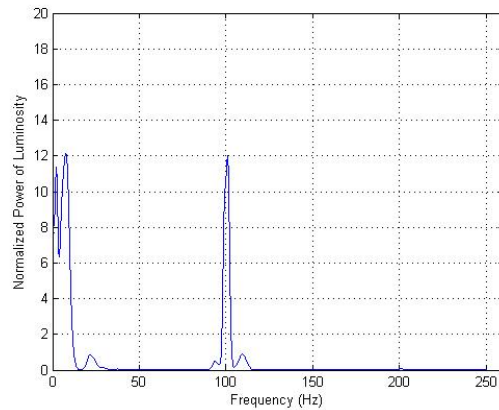


شکل ۴- شدت نور برای حالت نسبت تعادل ۱/۲، فرکانس ۴۰ هرتز و سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه

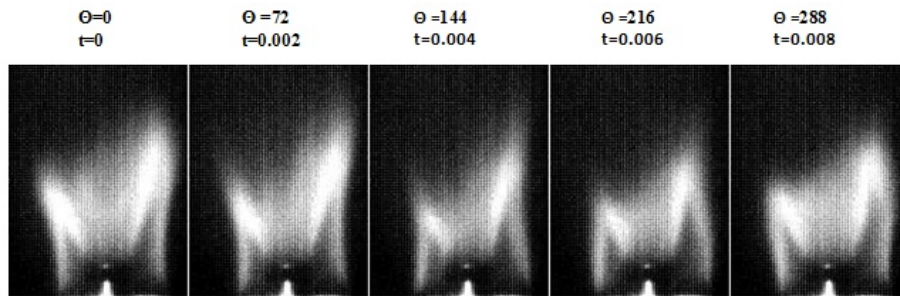


شکل ۵- نوسان شعله M- شکل در یک دوره تناوب برای حالت نسبت تعادل ۱/۲، فرکانس ۴۰ هرتز و سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه

در ادامه، یک نمونه از نوسانات انتقالی برای شعله M- شکل برای حالت نسبت تعادل ۱/۲، فرکانس ۱۰۰ هرتز و سرعت ۱/۵۴ متر بر ثانیه ذکر شده است. در این حالت طول شعله برابر با ۲/۱ سانتیمتر است، بنا به بخش (۱) از آنجا که طول شعله بزرگتر از طول موج ۱ سانتیمتر می‌باشد در نتیجه شعله نوسانات انتقالی خواهد داشت. با توجه به شکل (۶) فرکانس نوسانات شدت نور برابر با فرکانس تحریکی است. همچنین در شکل (۷) تغییرات شکل شعله در یک دوره تناوب آورده شده است.

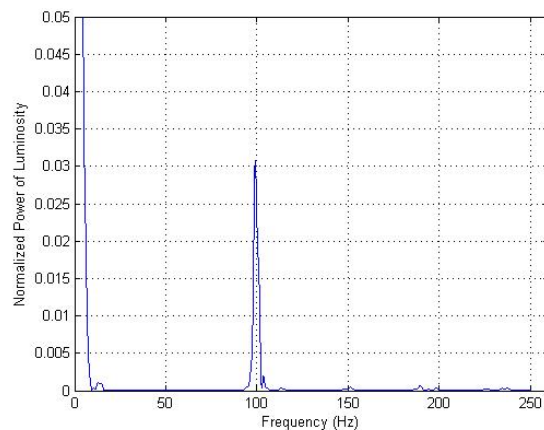


شکل ۶- شدت نور برای حالت نسبت تعادل ۱/۲، فرکانس ۱۰۰ هرتز و سرعت ۱/۵۴ متر بر ثانیه

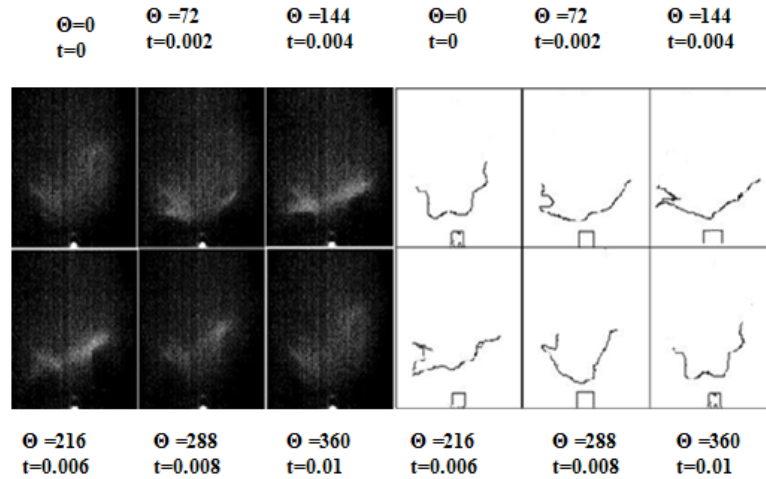


شکل ۷- نوسان شعله M- شکل در یک دوره تناوب برای حالت نسبت تعادل ۱/۲، فرکانس ۱۰۰ هرتز و سرعت ۱/۵۴ متر بر ثانیه

برای شعله V- شکل با نسبت تعادل ۰/۹، فرکانس ۱۰۰ هرتز و سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه طول شعله برابر با ۱۲/۹۸ میلیمتر محاسبه شده است که باز بنا به بخش (۱) نوسانات شکل انتقالی خواهند داشت. با توجه به شکل (۸)، شدت نور در فرکانس ۱۰۰ هرتز تشدید می‌شود که این نشان دهنده تحریک شعله با فرکانس اعمالی به آن است. در شکل (۹) رفتار شعله در یک دوره تناوب با اختلاف فاز ۷۲ درجه نشان داده شده است.



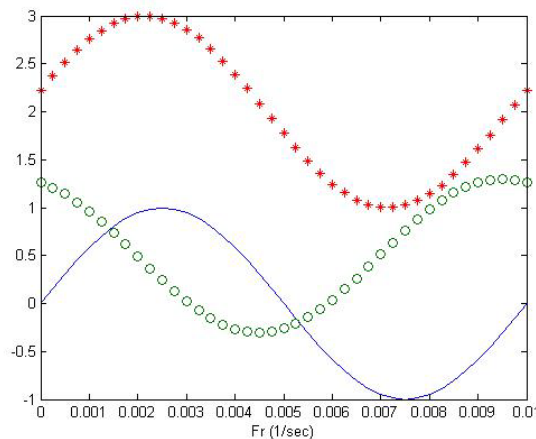
شکل ۸- شدت نور برای حالت نسبت تعادل ۰/۹، فرکانس ۱۰۰ هرتز و سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه



شکل ۹- نوسان شعله V-شکل در یک دوره تناوب برای حالت نسبت تعادل ۰/۹، فرکانس ۱۰۰ هرتز و سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه

همانطور که در شکل (۹) نشان داده شده است، در یک دوره تناوب برای فرکانس ۱۰۰ هرتز که برابر با ۰/۰۱ ثانیه می باشد سطح شعله تغییر می کند. نسبت مساحتها که متناسب با شدت نور است تقریب خوبی برای بیان نرخ حرارت آزاد شده است. نرخ انتقال حرارت زمانی که دامنه نوسانات فشار بالا می رود، رفتار غیرخطی از خود نشان می دهد. این مقدار وابسته به فرکانس و نسبت تعادل می باشد. مکانیسم تغییر سطح شعله به علت اثر گردابه های تشکیل شده است. شعله بر اثر لایه برشی تولید شده از میله مرکزی در داخل به سختی پایدار می شود و در صورتیکه تحت تاثیر نوسانات با دامنه بالا قرار بگیرد، از حالت تعادل خارج شده و لایه برشی درونی به داخل چرخیده و باعث ایجاد گردابه می شوند. این گردابه ها با سطح شعله برخورد کرده و آن را چروکیده می کنند. از آنجا که سطح شعله متناسب با شدت نور آزاد شده از شعله است، در نتیجه با کاهش سطح شعله از شدت نور نیز کاسته می شود.

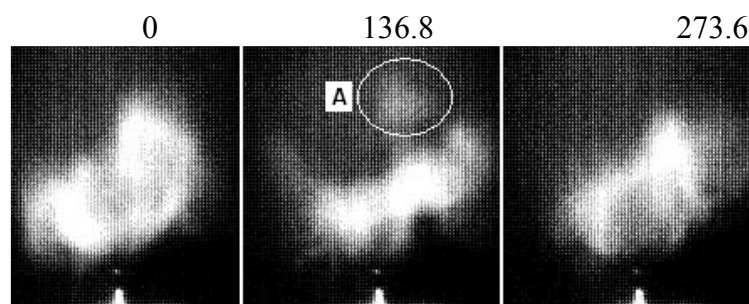
در مرحله بعد، با استفاده از دامنه و اختلاف فاز بدست آمده از FFT موج شدت نور برای فرکانس تحریکی ۱۰۰ هرتز در یک دوره تناوب رسم شده است. با توجه به شکل مشخص است که بیشترین شدت نور در زمان اتفاق می افتد که در این نقطه نرخ انتقال حرارت که متناسب با سطح شعله است افزایش می یابد. همانطور که گفته شد، لایه برشی داخلی به هنگام چرخش به دور خود و ایجاد گردابه مقدار مواد واکنش دهنده را وارد سطح شعله می کند که خود باعث افزایش نرخ انتقال حرارت می شود. شکل (۱۰) تطبیق نتایج با شکل (۹) در یک دوره تناوب نشان می دهد.



شکل ۱۰- منحنی موج آکوستیکی فرستاده شده توسط بلندگو(آبی)، ضبط شده توسط میکروفن(سبز) و شدت نور (قرمز)

با توجه به شکل (۱۰)، نرخ انتقال حرارت به علت کاهش سطح شعله، کاهش یافته و در فاز ۲۱۶ به کمترین مقدار خود می-رسد که مربوط به زمان ۰/۰۰۶ ثانیه می‌باشد. بنا به مشاهدات انجام شده، دو علت برای تغییر سطح شعله وجود دارد: ۱- المانهای شعله در لایه برشی داخلی و خارجی که به علت نوسانات باعث ایجاد گردابه می‌شوند و در نتیجه در سطح برخورد باعث ایجاد برآمدگیهایی به نام کاسپ^۱ در سطح شعله شده و موجب از بین رفتن سطح شعله نیز می‌شوند. ۲- برخورد المانهای مجاور به هم باعث از بین رفتن سطح شعله می‌شود.

نتایج تجربی بدست آمده برای حالت نسبت تعادل ۱/۲، فرکانس ۱۹۰ هرتز و سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه مشاهده شد. همانطور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، در فرکانس ۱۹۰ هرتز که نزدیک به فرکانس تشدیداست، تغییرات سطح شعله را در یک دوره تناوب در فاز ۱۳۶/۸ که با نقطه A مشخص شده سطح شعله در اثر برخورد المانهای مجاور از بین رفته و از شعله اصلی جدا شده است. مشابه این پدیده توسط دالینگ^۲ در بررسی دینامیک شعله پیش مخلوط مخروطی مشاهده شده است [۵].



شکل ۱۱- جدایش شعله در فاز ۱۳۶/۸ درجه برای حالت نسبت تعادل ۱/۲، فرکانس ۱۹۰ هرتز و سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه

بنابراین گردابه‌ها با وجود اینکه باعث افزایش سطح شعله با چرخاندن شعله به دور خود می‌شوند ولی گاه باعث ایجاد برآمدگی-هایی در سطح شعله شده که باعث از بین رفتن سطح شعله و در نتیجه کاهش شدت نور می‌گردند.

^۱ Cusp

^۲ Dowling

۴-۲- بدست آوردن تابع تبدیل شعله

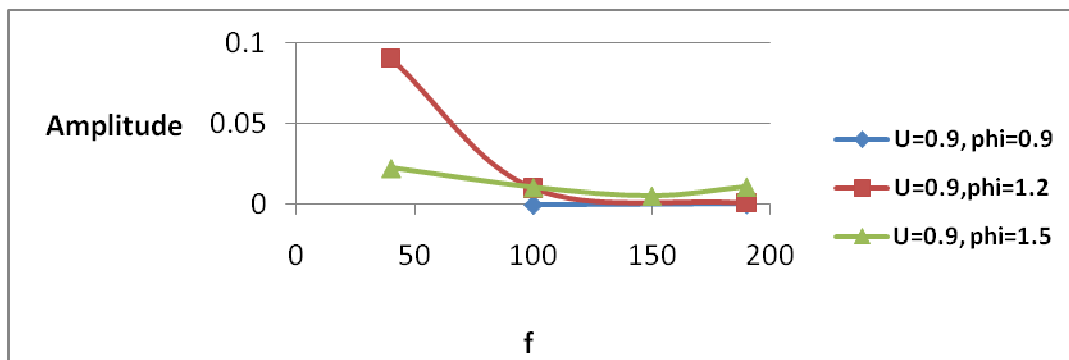
دامنه تابع تبدیل در رابطه (۴) تعریف شده که بیانگر نرخ تغییر حرارت آزاد شده به نوسانات سرعت می‌باشد.

$$F = (\bar{I}_{OH^*} / \bar{I}_{OH^*} / u' / U) \quad (۴)$$

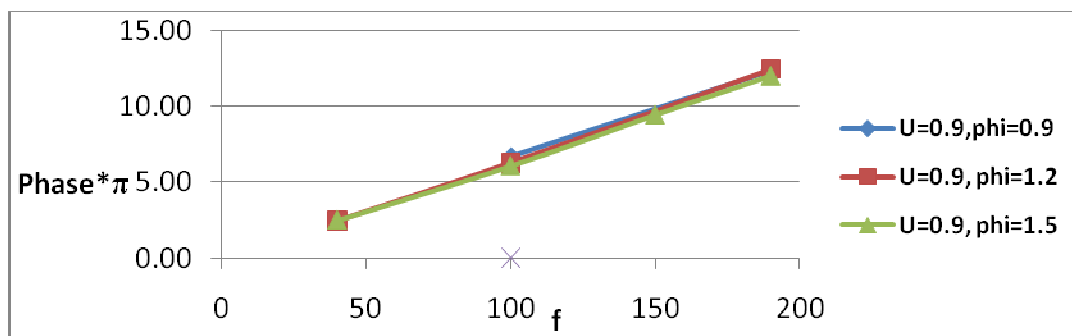
برای بدست آوردن تابع تبدیل با بررسی نوسانات هارمونیک فشار در داخل محفظه، از آنجا که امکان اندازه‌گیری نوسانات سرعت وجود نداشت، تابع نرخ نوسانات شدت نور به نوسانات فشار طبق رابطه (۵) بدست آمد.

$$F = (I' / \bar{I} / p' / P) \quad (۵)$$

نوسانات شدت نور و نوسانات فشار همانطور که در بخش پردازش تصاویر ذکر شد اندازه‌گیری شده که نتایج به صورت تابع تبدیل برای حالت سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه در شکل (۱۲) و (۱۳) آورده شده است. تابع تبدیل بدست آمده رفتاری مشابه تابع تبدیل حاصل از نتایج تجربی کندل و بیرباد دارد.



شکل ۱۲- دامنه تابع تبدیل برای سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه برای سه نسبت تعادل ۱/۵، ۱/۲، ۰/۹



شکل ۱۳- فاز تابع تبدیل برای سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه برای سه نسبت تعادل ۱/۵، ۱/۲، ۰/۹



۵- نتیجه گیری

در کار حاضر به بررسی اثرات نوسانات سرعت با فرض ثابت بودن سرعت شعله بر روی پاسخ شعله V-شکل و M-شکل پرداخته شد. در دوره تناوب فرکانس تحریک شده، گردابه‌های ایجاد شده از این نوسانات نه تنها باعث افزایش سطح شعله می‌شوند بلکه در بعضی حالتها به علت برخورد با لبه‌های شعله باعث نابودی آن بخش از شعله نیز می‌گردند. همچنین نوسانات آکوستیکی باعث تغییر شکل شعله شده و نرخ حرارت آزاد شده را تغییر می‌دهند که در صورت کوپل شدن با نوسانات آکوستیکی باعث ناپایداری محفظه می‌شوند. در بازه‌ای از فرکانس‌ها شعله V-شکل و M-شکل مانند آمپلی‌فایر عمل کرده که این نشان دهنده حساستر بودن این شکل شعله نسبت به نوسانات می‌باشد. همچنین از تابع تبدیل بدست آمده از پردازش داده‌ها که به صورت نوسانات حرارت بر نوسانات فشار تعریف شده است، برای پیش‌بینی شرایط ناپایداری می‌توان استفاده کرد.

مراجع

- 1- Schuller, T., and Candel, S., 2003 "Self-Induced Combustion Oscillations of Laminar Premixed Flames stabilized on Annular burners", *Journal of Combustion and Flame*, Vol. 135, pp 525-537.
- 2- Birbaud, A.L., and Candel, S., 2006 "Upstream Flow of a Laminar Premixed Conical Flame Submitted to Acoustic Modulations", *Journal of Combustion and Flame*, Vol. 146, pp. 541-552.
- 3- Preetham, and Lieuwen, T., 2006 'Response of Premixed Flames to Flow Oscillations', Ph.D. Thesis, School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.
- 4- Lieuwen, T., 1999 'Investigation of Combustion Instability Mechanisms in Premixed gas Turbines', Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.
- 5- Dowling, A.P., and Balachandran, R., 2005 "Experimental Investigation of the Nonlinear Response of Turbulent Premixed Flames to Imposed Inlet Velocity Oscillations", *Journal of Combustion and Flame*, Vol. 143, pp. 37-55.