

## پاسخ شعله پیش مخلوط V- شکل و M- شکل به تحریک آکوستیکی

روزبه ریاضی\*، نگار نباتیان\*\* و محمد فرشچی\*\*\*

دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا

(دریافت: ۱۳۸۹/۱/۲۰، پذیرش: ۱۳۸۹/۹/۸)

بررسی تجربی حاضر به مطالعه پاسخ شعله‌های پیش‌مخلوط آرام V- شکل و M- شکل به نوسانات آکوستیکی پرداخته است. به طور کلی محفظه‌های احتراقی که در آن‌ها شعله V- شکل تشکیل می‌شود نسبت به ناپایداری احتراق حساس هستند. شعله‌های V- شکل بر روی میله مرکزی مشعل تشکیل می‌شوند و شعله‌های M- شکل به میله مرکزی مشعل و لبه لوله مشعل می‌چسبند. این بر خلاف شعله‌های مخروطی است که فقط به لبه لوله مشعل می‌چسبند. به همین دلیل شعله‌های V- شکل و M- شکل در مقایسه با شعله‌های مخروطی حساسیت بیشتری به نوسانات جریان نشان می‌دهند. در مطالعه حاضر برای تشکیل شعله‌های پیش‌مخلوط V- شکل و M- شکل از مخلوط پروپان- هوا استفاده شده است. در ابتدا با تغییر نسبت هم‌ارزی سوخت- هوا، محدوده‌های مناسب نسبت هم‌ارزی برای تشکیل شعله‌های پایدار V- شکل و M- شکل تعیین شد. نتایج اولیه نشان داد که شعله M- شکل در مقایسه با شعله V- شکل در بازه محدودتری از نسبت هم‌ارزی به صورت پایدار تشکیل می‌شود. سپس برای مطالعه پاسخ شعله به نوسانات آکوستیک از یک بلندگو جهت تولید امواج آکوستیکی با دامنه ثابت در بازه معینی از تواترهای (Frequency) تحریک استفاده شد و نوسانات فشار شعله تحریک شده در پایین دست جریان توسط یک میکروفون اندازه‌گیری شد. تصاویر مربوط به نوسانات سطح شعله تحریک شده توسط یک دوربین سرعت بالا (CCD Camera) ثبت شد و با استفاده از قابلیت‌های پردازش تصویر در نرم‌افزار MATLAB دامنه و فاز پاسخ شعله محاسبه شد. همچنین تغییرات شکل شعله و شدت نور آن، در طول یک دوره تناوب، برای مقادیر مختلف نسبت هم‌ارزی و دبی جریان بررسی شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که نوسانات سرعت و نحوه تولید و انتشار گردابه‌ها نقش مهمی در پاسخ شعله به نوسانات آکوستیکی دارند. همچنین فاز تابع پاسخ شعله نسبت به تغییرات تواتر تحریک رفتاری شبه- خطی دارد. این امر بیانگر آن است که تاخیر زمانی مربوط به نوسانات گرمای آزاد شده نسبت به نوسانات تحریک شعله مقداری معین است. به عبارتی دیگر نوسانات آکوستیک همواره پس از مدت زمانی معین به سطح شعله می‌رسند. نتایج مربوط به بهره پاسخ شعله نیز نشان می‌دهد که شعله در محدوده معینی از تواترهای تحریک آکوستیک به تغییرات نسبت هم‌ارزی حساس‌تر است. با بررسی رفتار شعله در یک دوره تناوب می‌توان محدوده زمانی مربوط به بیشینه گرمای آزاد شده از شعله را تعیین کرده و تاثیر متغیرهای غیرخطی در پاسخ شعله را بررسی کرد.

کلید واژه: شعله V- شکل، شعله M- شکل، تابع پاسخ شعله، نسبت هم‌ارزی

### مقدمه

محفظه‌های احتراق پیش‌مخلوط رقیق در توربین‌های گازی با پایین آوردن دمای شعله باعث کاهش میزان تولید آلاینده NOx می‌شوند. این‌گونه محفظه‌ها نسبت به ناپایداری‌های احتراق که در اثر رشد نوسانات فشار در داخل محفظه پدید می‌آید، حساس هستند. نوسانات فشار تولید شده در محفظه احتراق باعث ایجاد نوسانات گرمای آزاد شده از شعله می‌شوند و این نوسانات در یک چرخه به نوبه خود موجب تولید نوسانات فشار می‌شوند. به عبارتی می‌توان گفت که در این سامانه‌ها گرمای

\* دانشجوی دکترا (ایمیل: ro\_riazi@ae.sharif.edu)

\*\* دانشجوی کارشناسی ارشد (ایمیل: negar.nabatian@gmail.com)

\*\*\* استاد- نویسنده مخاطب (ایمیل: farshchi@sharif.edu)

آزاد شده از شعله با نوسانات میدان جریان در محفظه کوپل می‌شود. این کوپلینگ به گونه‌ای است که دینامیک سامانه به صورت نوسانات گرمای آزاد شده و نوسانات متغیرهای میدان جریان ظاهر می‌شود. این نوسانات جریان و ارتعاشات سازه‌ای ناشی از آن می‌تواند اثرات نامطلوبی بر عملکرد محفظه داشته باشد [۱-۴] و موجب کاهش طول عمر قطعاتی که در قسمت‌های گرم محفظه کار می‌کنند شود [۵].

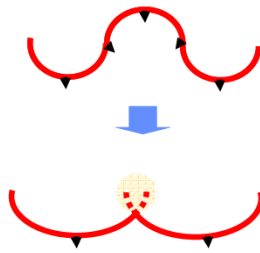
برای فرو نشاندن نوسانات ناشی از ناپایداری‌های احتراق باید درک درستی از سازوکار تولید این نوسانات وجود داشته باشد. مطالعات وسیعی در مورد اثر تواتر (Frequency)، شکل شعله و نوسانات جریان بر روی رفتار خطی و غیرخطی شعله انجام شده است. شولر و همکاران [۶] ناپایداری‌های خودالقایی شعله پیش‌مخلوط آرام را مطالعه کردند و روشی برای مشخص کردن نقاط پایداری بر اساس پاسخ شعله نسبت به نوسانات جریان به دست آوردند. نتایج نشان داد که به هنگام از بین رفتن سطح شعله در اثر اندرکنش المان‌های همجوار شعله در حین تولید و انتشار گردابه‌ها، پالس فشاری تولید می‌شود که در صورت هم‌فاز شدن با آکوستیک محفظه باعث تشدید می‌شود [۶]. همچنین بیرباد و همکاران [۷] پاسخ شعله مخروطی را نسبت به نوسانات آکوستیکی به صورت تجربی بررسی کردند و دامنه و اختلاف فاز بین سیگنال تحریک و سیگنال نوسانات گرمای آزاد شده را محاسبه کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که پاسخ شعله به سه متغیر عدد استروهال، قطر محفظه و سرعت جریان بستگی دارد [۷]. در مطالعه دیگری دورو و همکاران [۸] مشخصات غیر خطی دینامیک شعله را بررسی کردند. این مطالعه در قالب اندازه‌گیری تابع تبدیل چهار نوع شعله با هندسه‌های متفاوت، در شرایط یکسان پاشش مخلوط سوخت- هوا انجام شد. آزمایش‌ها بر روی یک شعله مخروطی، شعله V-شکل، شعله M-شکل، و مجموعه‌ای از شعله‌های مخروطی ریز پایدار شده بر یک صفحه مشبک انجام شد. آنها تغییرات بهره و فاز تابع تبدیل شعله را نسبت به سطح نوسانات بررسی کردند و نشان دادند که پاسخ شعله به طور چشمگیری به شکل آرام شعله، در حالت بدون تحریک بستگی دارد.

نوسانات گرمای آزاد شده از جمله عوامل ایجاد ناپایداری است که خود ناشی از عوامل مختلفی از جمله نوسانات سرعت، از بین رفتن سطح شعله به صورت محلی و کلی، احتراق مجدد، حساسیت نرخ سوزش به نوسانات فشار، شرایط مرزی غیرخطی، برهم‌کنش شعله با دیواره‌های محفظه و نوسانات نسبت هم ارزی است. خاموشی و احتراق مجدد ناحیه‌ای شعله باعث تغییر غیرخطی دامنه نوسانات گرمای آزاد شده، به دلیل نوسانات سرعت، می‌شود [۹]. به طور کلی نرخ گرمای آزاد شده از سطح یک شعله پیش‌مخلوط از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

که در آن  $\rho_u$  چگالی مخلوط گاز،  $S_L$  سرعت شعله،  $h_R$  گرمای حاصل از واکنش و  $A$  سطح شعله هستند. اندیس  $u$  نشانگر مواد نسوخته است و انتگرال بر روی کل سطح شعله گرفته می‌شود. از رابطه (۱) دیده می‌شود که نوسانات گرمای آزاد شده از برهم‌کنش نوسانات سطح شعله، نرخ سوزش مواد واکنش‌دهنده و گرمای حاصل از واکنش به دست می‌آید. برای بررسی اثر نوسانات سرعت بر روی پاسخ شعله،  $h_R$  و چگالی مخلوط ثابت فرض می‌شوند. نوسانات در سرعت سوختن مواد واکنش‌دهنده باعث ایجاد نوسان در موقعیت جبهه شعله می‌شود. این امر باعث نوسان سطح شعله می‌شود که نتیجه آن نوسان در نرخ گرمای آزاد شده است. طول شعله ( $L_F$ ) با طول موج نوسانات سرعت  $\lambda$  که ناشی از انتشار امواج فشاری طولی است، مقایسه می‌شود. اگر طول شعله کمتر از طول موج نوسان آکوستیکی باشد کل شعله به صورت یکپارچه بالا و پایین می‌رود و نوسان هارمونیک دارد که به آن از دیدگاه آکوستیکی شعله متراکم (Acoustically compact flame) می‌گویند. اگر طول شعله بیشتر از طول موج نوسان آکوستیکی باشد، نوسانات انتقالی در سطح شعله انتشار می‌یابند.

در بررسی دینامیک شعله عوامل موثر بر پاسخ غیرخطی آن مد نظر قرار می‌گیرد. در شکل (۱) شعله با نوسان گذرا تحریک می‌شود که باعث چروکیدگی شدن سطح شعله می‌شود. لذا با گذشت زمان انحنای ایجاد شده در سطح شعله به حالت تخت خود باز می‌گردد. بنابراین، یک فرایند سینماتیکی باعث از بین رفتن سطح شعله می‌شود. نرخ از بین رفتن سطح شعله به دامنه و طول موج نوسانات سطح شعله بستگی دارد.



شکل ۱- طرح شعله چروکیده شده (بالا) و چگونگی از بین رفتن سطح شعله طی فرایند سینماتیکی [۱۰]

انحنای که دامنه بالایی دارند سریع تر از انحنای با دامنه کوچک، تخت می شوند. همچنین انحنای با طول موج کوتاه تر سریع تر از طول موج های بلندتر تخت می شوند. همان طور که گفته شد این عامل باعث افزایش پاسخ غیرخطی در تواترهای بالاتر، که نوسانات در آن، طول موج های کوتاهتری دارند، می شود. علاوه بر میدان جریان، میدان نوسانات هم در پاسخ شعله موثرند. به طور کلی میدان سرعت به دو بخش غیر چرخشی تراکم پذیر (میدان آکوستیکی) و چرخشی تقسیم می شود. در جریان همگن، نوسانات چرخشی با سرعت جریان متوسط که در برگیرنده اثرات گرادیان دانسیته (ناشی از احتراق)، اثرات میدان چرخشی و میدان پتانسیل است، انتقال می یابند. ویژگی های آکوستیکی با طول موج آکوستیک ( $\lambda_a = c/f$ ) تغییر می کنند، در حالی که نوسانات چرخشی با طول موج انتقالی ( $\lambda_c = u_0/f$ ) که در آن  $u_0$  سرعت متوسط جریان و  $f$  تواتر نوسانات است) در میدان جریان تغییر می کنند و با سرعت متوسط جریان منتشر می شوند. بنابراین در میدان هایی با عدد ماخ پایین، طبق رابطه  $M = u_0/c = \lambda_c/\lambda_a$ ، طول موج نوسانات چرخشی کوتاه تر از طول موج نوسانات آکوستیکی با نسبتی برابر با عدد ماخ جریان است و نرخ رشد ناپایداری ها به شدت تحت تاثیر دامنه و تواتر امواج آکوستیکی حاصل از ناپایداری ها قرار می گیرد. برای دامنه های بالاتر، انحنای قوس های بزرگتری در سطح شعله توسعه می یابند که با سرعت جریان انتشار پیدا می کنند. این انحنای تولید شده در سطح شعله، میدان آکوستیکی را تحت تاثیر قرار می دهند و باعث تغییر ماهیت میدان از حالت همگن به حالت انتقالی ناهمگن و در نتیجه ایجاد رفتار غیرخطی در شعله می شوند [۱۰].

در مطالعه حاضر برای شناخت رفتار دینامیکی شعله های V- شکل و M- شکل، اثر نوسانات آکوستیکی بر پاسخ این گونه شعله ها به صورت تجربی بررسی شده است. ابتدا با استفاده از تئوری حاکم بر شعله های پیش مخلوط V- شکل و M- شکل، متغیرهای موثر در بررسی پاسخ این شعله ها (متغیرهایی نظیر محدوده نسبت هم آری و تواتر تحریک شعله) مورد مطالعه قرار گرفت. سپس با تهیه یک مشعل آزمایشگاهی، آزمون های لازم برای مطالعه اثر این متغیرها بر رفتار شعله انجام شد.

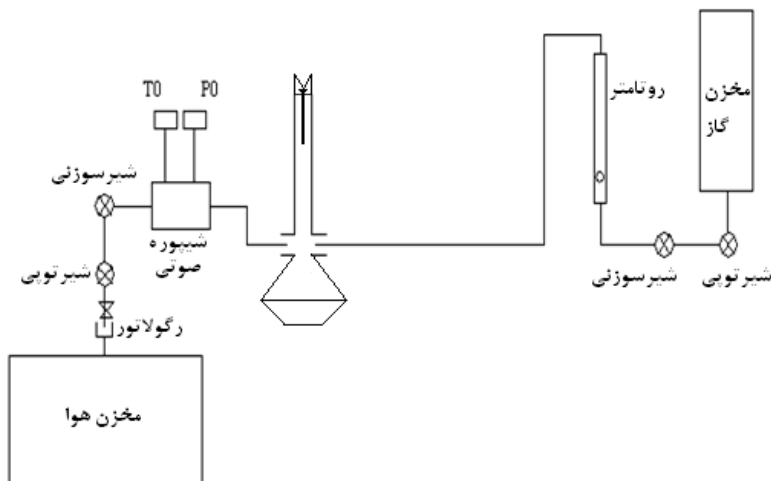
## نتایج تجربی

در این بخش در ابتدا شرحی از سامانه آزمایشگاهی و نحوه اندازه گیری و پردازش داده ها ارائه شده است. پس از آن نیز نحوه اجرای آزمایش ها و تهیه جداول مربوط به آزمون ها شرح داده شده است.

### شرح سامانه آزمایشگاهی

همان طور که در شکل (۲) دیده می شود هوا پس از خروج از کمپرسور برای تنظیم فشار خط هوا از یک تنظیم کننده (Regulator) عبور داده می شود. سپس جریان آن در مسیر خط هوا توسط یک شیر توپی (Ball valve) قطع و وصل می شود. پس از عبور از شیر توپی به وسیله یک شیر سوزنی (Needle valve) مقدار دبی عبوری کنترل می شود. پس از آن هوا با عبور از یک شیبوره صوتی، که برای اندازه گیری دبی به کار می رود، وارد لوله مشعل احتراق می شود. سوخت نیز پس از عبور از شیر توپی، که برای قطع و وصل جریان به کار می رود، از یک شیر سوزنی عبور می کند که برای کنترل دبی سوخت به کار می رود. پس از این شیر، رواتر بر سر راه جریان قرار دارد که توسط آن مقدار دبی سوخت اندازه گیری می شود. باید توجه کرد که به دلیل پایین بودن

دبی جریان سوخت، استفاده از شیپوره صوتی روش مناسبی برای اندازه گیری دبی جریان در مسیر سوخت نیست. جریان پس از عبور از روتامتر وارد لوله احتراق می‌شود. جریان هوا و سوخت با زاویه ۱۸۰ درجه با یکدیگر برخورد می‌کنند و جریان پیش مخلوط پدید می‌آید. در نهایت جریان پیش مخلوط حاصله از لوله مشعل عبور کرده و محترق می‌شود.



شکل ۲- طرحواره دستگاه

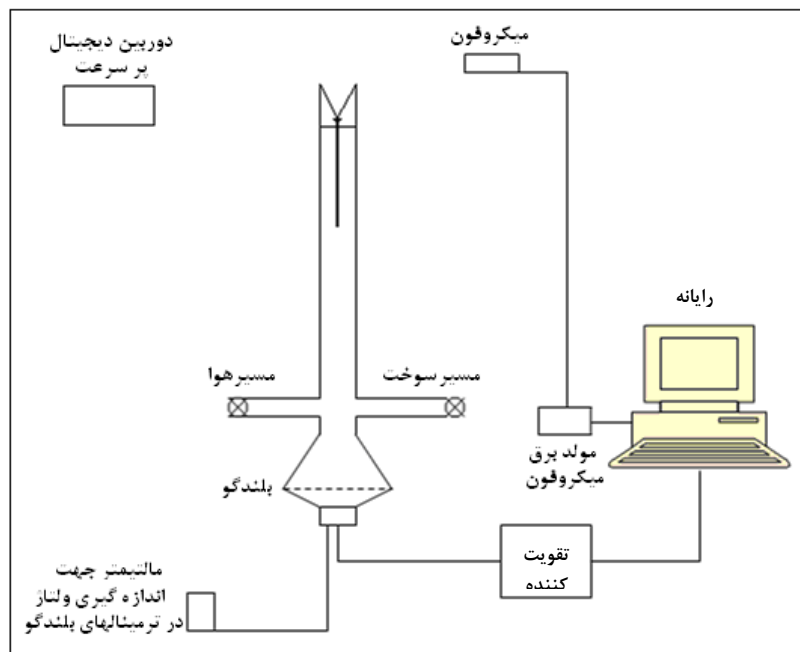
لوله مشعل، یک لوله استوانه‌ای به طول ۲۰ سانتی‌متر و با قطر خارجی ۲۲ میلی‌متر است. یک میله مرکزی با قطر ۶ میلی‌متر و با سری پخ به قطر ۸ میلی‌متر به محور لوله متصل شده است. سر میله مرکزی به میزان ۴ میلی‌متر بالاتر از لوله مشعل قرار دارد. این میله مرکزی، به طول ۱۰ سانتی‌متر، در وسط لوله مشعل توسط دو عدد پیچ با فاصله ۱ سانتی‌متر و به صورت عمود برهم در موقعیت خود مهار می‌شود که با تنظیم پیچ‌های مذکور می‌توان میله را کاملاً در مرکز لوله مشعل قرار داد. در مسیر جریان از سه لایه توری در پایین و یک لایه توری در بالا برای از بین بردن اثر حضور پیچ‌ها در مسیر جریان و آرام کردن جریان استفاده شده است. مشعل توسط سوخت پروپان و هوا تغذیه می‌شود. آزمون‌های آکوستیکی در بازه تواتری ۴۰-۲۰۰ هرتز انجام شده‌اند که بازه مورد نظر با توجه به ناحیه پاسخ خطی بلندگو و تواترهای طبیعی لوله مشعل انتخاب شده است. برای تولید امواج فشاری و تحریک شعله از یک بلندگوی ۳۵ واتی با امپدانس ۸ اهم (مدل OEM, YD158) استفاده شده است. این بلندگو در قسمت پایینی مشعل، پایین‌تر از محل اتصال لوله‌های سوخت و هوا، توسط یک مخروط ناقص به بخش تحتانی مشعل متصل شده است. هدف از نصب بلندگو پخش سیگنال‌هایی با تواتر مشخص برای بررسی پاسخ سامانه به تواتر ورودی است. البته لازم است به پاسخ خود بلندگو در تواترهای مختلف نیز توجه شود.

### اندازه‌گیری و پردازش داده‌ها

پس از تنظیم دبی جریان سوخت و هوا و به دست آوردن نسبت هم‌ارزی ( $\phi$ ) مورد نظر، مطابق شکل (۳)، نوسانات آکوستیکی فشار توسط میکروفنی که در فاصله ۲۵ سانتی‌متری از لبه مشعل و در ارتفاع ۵ سانتی‌متری از سر آن نصب شده، اندازه‌گیری می‌شود. میکروفن به کار رفته (مدل BEHRINGER, ECM800) با پاسخ تواتری خطی در بازه ۱۵ هرتز تا ۲۰ هرتز، امپدانس در حدود ۶۰۰ اهم دارد. اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط میکروفن با استفاده از نرم‌افزار کول‌ادیت (Cool Edit) در رایانه ضبط می‌شود. این فایل سپس توسط کد تهیه شده در نرم‌افزار متلب (MATLAB) پردازش می‌شود. بنابراین با توجه به داده‌های سازمان یافته از خروجی متلب می‌توان تواتر و دامنه موج غالب را به دست آورد.

یکی از روش‌های به دست آوردن فرکانس‌های طبیعی سیستم، اعمال مجموعه‌ای از تواترهای تحریک در قالب جاروب تواتری (Frequency Sweep) سامانه است. در این روش، در مطالعه حاضر، با استفاده از نرم‌افزار کول‌ادیت سیگنال سینوسی

تک کاناله بدون هارمونیک با فرکانس متغیر از صفر تا ۵ کیلوهرتز و بالعکس تولید می‌شود. این سیگنال، تقویت (Amplify) شده و به بلندگو داده می‌شود و شکل موج آن توسط یک اسیلوسکوپ (Oscilloscope) کنترل می‌شود. کالیبراسیون سامانه تحریک برای تولید دامنه تحریک یکسان برای تمام آزمایش‌ها امری اجتناب ناپذیر بود. با استفاده از داده‌های میکروفون، تقویت کننده (Amplifier) طوری تنظیم شد که میزان ثابتی از سطح نوسانات صوتی در خروجی مشعل در تمام تواترهای تحریک به دست آید. در همین حال، ولتاژ در ترمینال‌های بلندگو نیز اندازه‌گیری شد. این مقادیر ثبت شده ولتاژ، برای بازتولید دامنه تحریک یکسان در همه تواترهای تحریک به کار برده شد. نتایج کالیبراسیون نشان داد که بلندگو در بازه صفر تا ۲۵۰ هرتز به صورت خطی عمل می‌کند. این مسئله به همراه داده‌های مربوط به تواتر طبیعی سامانه، معیارهای تعیین کننده‌ای برای مشخص کردن بازه تواتری مطلوب برای انجام آزمون‌های آکوستیکی بودند.



شکل ۳- طرحواره سامانه تحریک آکوستیکی وسامانه عکسبرداری

نکته مهم در مورد موقعیت میکروفون، عدم قرارگیری آن در گره و یا شکم های فشاری است. موقعیت مناسب برای میکروفون (ارتفاع ۵ سانتی متری از سر مشعل) پس از سعی و خطا به دست آمد. موقعیت محور میکروفون نیز در زاویه ۹۰ درجه نسبت به محور مشعل تنظیم شد و فاصله شعاعی آن از مرکز میله مشعل ۲ سانتی متر در نظر گرفته شد. این وضعیت قرارگیری برای جلوگیری از برخورد مستقیم امواج فشاری با میکروفون و در عین حال دریافت سطح مناسبی از امواج فشاری تنظیم شد. یکی دیگر از نکات قابل توجه در هنگام آزمون، جلوگیری از ایجاد پس‌خوران (Feed Back) بین سیگنال بلندگو و میکروفون است. در صورت ایجاد پس‌خوران، به دلیل تاخیرهای زمانی میان دریافت سیگنال توسط میکروفون و پخش مجدد آن توسط بلندگو، در نتایج مربوط به طیف تواتری نوسانات فشار وضوح قله‌ها کاهش می‌یابد. همچنین در برخی از فرکانس‌ها تشدیدهایی اضافی، که غیر واقعی هستند، رخ می‌دهد.

برای ثبت تصاویر مربوط به نوسانات سطح شعله، از یک دوربین سرعت بالا (CCD Camera) برای عکسبرداری با سرعت ۵۰۰ تصویر بر ثانیه در فاصله ۵۰ سانتی متری از مشعل استفاده شد. با استفاده از کد تهیه شده در نرم‌افزار متلب، تصاویر به دست آمده از عکسبرداری پردازش شد. بر اساس روش پردازش تصویر به کار رفته در این مطالعه در ابتدا، با توجه به دوره تناوب مربوط به هر تواتر تحریک، عکس‌ها از یکدیگر جدا می‌شوند. از طرفی با در نظر داشتن سرعت داده‌برداری (۵۰۰ تصویر

بر ثانیه) در هر ۰/۰۲ ثانیه یک عکس گرفته می‌شود. با تقسیم نمودن دوره تناوب مربوط به هر تواتر تحریک بر این زمان (۰/۰۲ ثانیه) تعداد تصاویر در یک چرخه به دست می‌آید. سپس با در نظر گرفتن تعداد عکس‌های تهیه شده در هر چرخه، فاز مربوط به هر عکس تعیین می‌شود. بدینوسیله تصاویر هم‌فاز برهم‌نهی شده و متوسط تصویر در هر فاز معین به دست می‌آید. در مرحله بعد با برهم‌نهی همه تصاویر تفکیک شده و مشخص کردن پیکسل‌های روشن، شدت نور مربوط به شعله به دست آمده و اطلاعات مربوط به شدت نور در حوزه تواتر بررسی می‌شود. مشابه روش به کار رفته در پردازش داده‌های صوتی، دامنه و فاز تواتر غالب مربوط به شدت نور شعله مشخص می‌شود. همچنین برای اندازه‌گیری طول شعله با استفاده از نرم‌افزار متلب تعداد پیکسل‌های قطر مشعل محاسبه شده و با دانستن قطر مشعل، طول هر پیکسل بر حسب میلی‌متر محاسبه می‌شود. سپس طول تعداد پیکسل‌های شعله در سه موقعیت اندازه‌گیری شده و با میانگیری و ضرب آن در طول هر پیکسل، طول شعله محاسبه می‌شود.

### نحوه اجرای آزمایش‌ها و تهیه جدول‌های مربوط به آزمون‌ها

با توجه به معادله استوکیومتری برای مخلوط هوا-پروپان، نسبت هم ارزی ( $\phi$ ) به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

که در این رابطه  $Q_{fuel}$  جریان حجمی سوخت و  $Q_{air}$  جریان حجمی هوا هستند. بدین ترتیب جدولی از آزمون‌ها برای مشخص کردن محدوده پایداری شعله‌های M و V تهیه می‌شود. برای تعیین کردن محدوده‌ای از نسبت‌های هم‌ارزی که در آن هر کدام از شعله‌های V و M پایدار می‌شوند، مجموعه‌ای از آزمون‌ها در چهار مقدار مختلف از دبی جریان هوا اجرا شد. در هر مقدار معین از دبی جریان هوا، محدوده پایداری شعله‌های V و M در دو چرخه کاهش و افزایش نسبت هم‌ارزی مورد بررسی قرار گرفت که اطلاعات به دست آمده در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- جدول آزمون‌ها برای مشخص کردن محدوده پایداری شعله‌های M و V

دبی حجمی هوا (lit/min)	سرعت U(m/s)	نسبت هم ارزی $\phi$	نسبت هم ارزی $\phi$	نسبت هم ارزی $\phi$	نسبت هم ارزی مربوط به برخاستگی شعله از روی مشعل
۱۸/۹۶	۰/۹	کاهش نسبت هم ارزی	۱/۸۳-۱/۰۷ (M)*	۱/۰۵-۰/۸ (V)*	۰/۷۵
		افزایش نسبت هم ارزی	۰/۹-۱/۱۵ (V)	۱/۲-۲ (M)	
۲۶/۱۹	۱/۲۵	کاهش نسبت هم ارزی	۱/۵۸-۰/۹۵ (M)	۰/۹۲-۰/۷۵ (V)	۰/۸
		افزایش نسبت هم ارزی	۰/۸-۱/۲۵ (V)	۱/۳-۲ (M)	
۳۲/۳۵	۱/۵۴	کاهش نسبت هم ارزی	۱/۵۸-۰/۹۵ (M)	۰/۹۲-۰/۷۷ (V)	۰/۸۵
		افزایش نسبت هم ارزی	۰/۸-۱/۳۵ (V)	۱/۴۲-۱/۵۸ (M)	
۳۶/۱۸	۱/۷۲	کاهش نسبت هم ارزی	۱/۷۸-۱/۲۵ (M)	۱/۲-۰/۸۵ (V)	۰/۹
		افزایش نسبت هم ارزی	۰/۸۶-۱/۴۹ (V)	۱/۵۲-۱/۷۸ (M)	

\* (V) شرایطی را که در آن شعله V پایدار می‌شود نشان می‌دهد و (M) نشان دهنده شرایطی است که شعله M پایدار می‌شود.

پس از به دست آوردن محدوده پایداری شعله‌های M و V برای سه مقدار مختلف از  $\phi$  در چهار تواتر و سه دبی مشخص آزمون‌های آکوستیکی انجام شده است که این اطلاعات در جدول (۲) ارائه شده است. بر اساس محدودیت‌های موجود در تعیین بازه مطلوب برای تواتر و دبی، و به دلیل مشابه بودن رفتار شعله در تواتر ۱۶۰ و ۱۹۰ هرتز در مقادیر بالا از دبی جریان

هوا ( $Q_{air} > 18.965 \text{ l/min}$ ) آزمون‌ها برای این محدوده از دبی هوا، فقط برای تواتر ۱۹۰ هرتز انجام شد. همچنین به دلیل عدم توانایی بلندگو برای تولید تواتر ۴۰ هرتز در دبی‌های بالای جریان هوا ( $Q_{air} > 18.965 \text{ l/min}$ )، فقط دو آزمون در تواتر تحریک ۴۰ هرتز برای دو میزان متفاوت از نسبت هم‌ارزی که در آن‌ها شعله M- شکل پایدار بود، در نظر گرفته شد.

جدول ۲- آزمون‌های آکوستیکی انجام شده برحسب دبی حجمی هوا، تواتر و نسبت هم‌ارزی

شماره آزمایش	دبی حجمی هوا (lit/min)	سرعت $U$ (m/s)	تواتر (Hz)	نسبت هم‌ارزی $\Phi I$
۱	۱۸/۹۶	۰/۹	۴۰	۱/۲
۲	۱۸/۹۶	۰/۹	۴۰	۱/۵
۳	۱۸/۹۶	۰/۹	۱۰۰	۰/۹
۴	۱۸/۹۶	۰/۹	۱۰۰	۱/۲
۵	۱۸/۹۶	۰/۹	۱۰۰	۱/۵
۶	۱۸/۹۶	۰/۹	۱۶۰	۱/۵
۷	۱۸/۹۶	۰/۹	۱۹۰	۰/۹
۸	۱۸/۹۶	۰/۹	۱۹۰	۱/۲
۹	۱۸/۹۶۵	۰/۹	۱۹۰	۱/۵
۱۰	۲۶/۱۹	۱/۲۵	۱۰۰	۱/۲
۱۱	۲۶/۱۹	۱/۲۵	۱۰۰	۱/۵
۱۲	۲۶/۱۹	۱/۲۵	۱۹۰	۱/۲
۱۳	۲۶/۱۹	۱/۲۵	۱۹۰	۱/۵
۱۴	۳۲/۳۵	۱/۵۴	۱۰۰	۰/۹
۱۵	۳۲/۳۵	۱/۵۴	۱۹۰	۱/۲
۱۶	۳۲/۳۵	۱/۵۴	۱۰۰	۱/۲

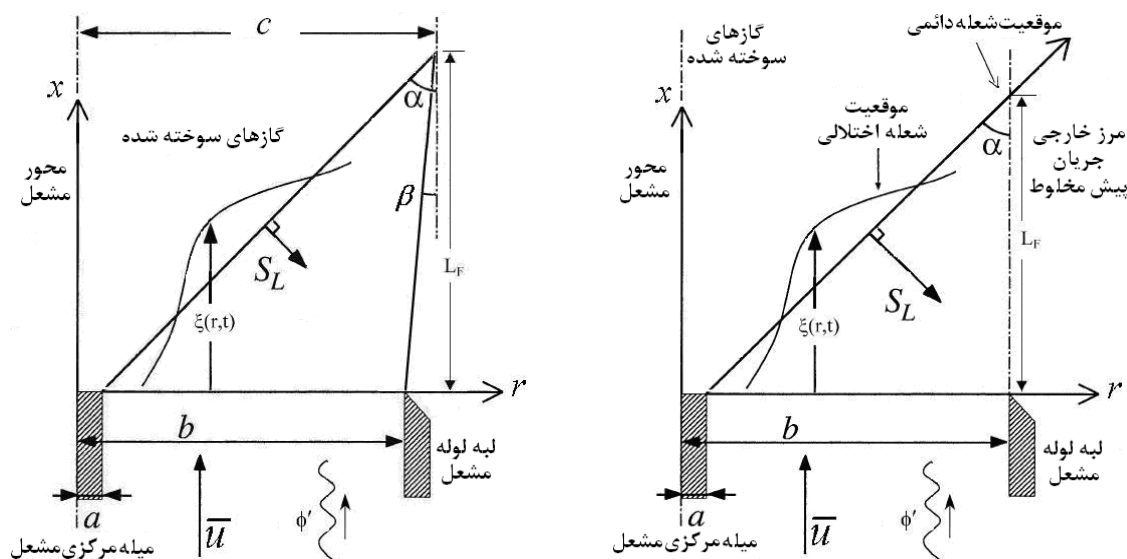
در مورد اندازه‌گیری سرعت جریان باید ذکر شود که در مجموعه آزمون‌های انجام شده، با تغییر فشار جریان در شیپوره صوتی از ۴۰۰۰ به ۱۰۰۰ پاسکال، دبی جریان از ۳۶/۱۸ به ۱۸/۹۶ لیتر بر دقیقه تغییر می‌کند. به عبارتی با در نظر گرفتن رابطه  $\bar{u} = \frac{\dot{m}}{\rho A} = \frac{\dot{m} \theta R}{P A}$  که در آن  $P, R, \theta, \dot{m}, \bar{u}$  به ترتیب سرعت جریان، دبی جریان، دما، ثابت گاز، فشار و سطح مقطع هستند، کاهش ۷۵ درصدی در فشار موجب کاهش ۵۰ درصدی در سرعت جریان گاز می‌شود. حال آنکه سرعت اندازه‌گیری شده توسط لوله پیتوت بدون وجود توری‌ها، میزان ۴۵ درصد کاهش ناشی از همین مقدار کاهش فشار را نشان می‌دهد.

## بحث و بررسی

در این بخش ابتدا محدوده پایداری شعله‌های M و V مورد بحث قرار گرفته و سپس بخشی از نتایج به دست آمده از آزمون‌های جدول‌های (۱) و (۲) ارائه و به تحلیل آن‌ها پرداخته شده است.

آزمون‌های احتراق برای به دست آوردن محدوده پایداری شعله‌های M و V- شکل و تحریک آکوستیکی شعله‌ها شعله‌های پیش‌مخلوط M- شکل و V- شکل نمونه‌هایی از شعله‌هایی هستند که در آن‌ها اغتشاشات کوچک جریان می‌تواند موجب تولید نوسانات شدید در سطح شعله و مقدار گرمای آزاد شده از شعله شود. به همین دلیل بررسی شرایط تشکیل این

شعله‌ها و مطالعه پاسخ آن‌ها به نوسانات جریان بسیار اهمیت دارد. در مطالعه حاضر بسته به میزان نرخ جریان پیش مخلوط، نسبت هم‌ارزی سوخت-هوا ( $\phi I$ )، و شرایط و محل جرقه اولیه، مطابق شکل (۴) هر یک از دو نوع شعله پایدار V- شکل و M- شکل بر روی میله مرکزی و لبه لوله مشعل هم‌محور تشکیل می‌شوند. شعله V- شکل فقط به میله مرکزی مشعل می‌چسبد و با گرمایی که به میله مرکزی منتقل می‌کند پایدار می‌شود. حال آنکه در شعله M- شکل سطوح شعله (هر کدام از شاخه‌های شعله M- شکل که به صورت تقارن محوری در شکل (۴) نمایش داده شده) به میله مرکزی و لبه خارجی لوله مشعل می‌چسبند و در نتیجه شعله، سطح بیشتری برای انتقال گرما در اختیار خواهد داشت. در واقع ساختار شعله M- شکل ترکیبی از ساختار شعله‌های مخروطی (Conical Flame) و V- شکل است.



طرحواره شعله M [۱۴]: شعاع میله مرکزی،  $b$  شعاع لوله مشعل، شعاع راس شعله،  $\alpha$  زاویه شاخه داخلی شعله نسبت به محور مشعل،  $\beta$  زاویه شاخه خارجی شعله نسبت به محور مشعل

طرحواره شعله V [۱۳] با در نظر گرفتن تقارن محوری نسبت به میله مرکزی مشعل: شعاع میله مرکزی،  $b$  شعاع لوله مشعل،  $\alpha$  زاویه شعله نسبت به محور مشعل،  $L_F$  طول شعله

شکل ۴- طرحواره شعله‌های V- شکل و M- شکل

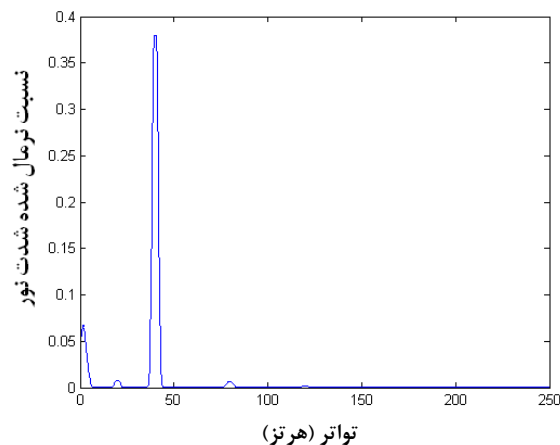
برای مشخص کردن محدوده شعله‌های V و M، همان‌گونه که در بخش قبل (نحوه اجرای آزمایش‌ها و تهیه جدول‌های مربوط به آزمون‌ها) گفته شد، مطابق جدول (۱) آزمایش‌ها به دو چرخه کاهش نسبت هم‌ارزی و افزایش آن طبقه‌بندی می‌شوند و محدوده‌هایی از نسبت هم‌ارزی که در آن هر کدام از شعله‌های V و M پایدار می‌شوند ثبت می‌شود. در چرخه کاهش نسبت هم‌ارزی، ابتدا فشار را تنظیم کرده و سپس سوخت را از بیشترین مقدار به تدریج کاهش می‌دهیم تا اولین شعله M- شکل ظاهر شود. سپس با کاهش بیشتر  $\phi I$ ، در محدوده خاصی از نسبت هم‌ارزی، شعله M- شکل ناپایدار شده و در مرحله گذار به شعله V قرار می‌گیرد. در این موقعیت با اندک کاهشی در مقدار  $\phi I$  شعله V پایدار می‌شود. با ادامه روند کاهشی در  $\phi I$  شعله V در یک نقطه ناپایدار شده و به دلیل پایین بودن نسبت سوخت به هوا، که منجر به کاهش سرعت شعله می‌شود، از میله جدا شده و خاموش می‌شود (Blow out). در چرخه افزایش نسبت هم‌ارزی پس از تنظیم فشار هوا، سوخت را از نقطه‌ای با نسبت هم‌ارزی بالاتر نسبت به شرایط نقطه خاموشی، که در آن شعله به شکل V است، به تدریج افزایش می‌دهیم. در این حالت نیز گذار از شعله V به M در محدوده معینی از نسبت هم‌ارزی صورت می‌پذیرد.

با توجه به جدول (۱) دو نکته قابل مشاهده است. نکته اول، تفاوت محدوده نسبت هم‌ارزی مربوط به شرایط گذار بین دو نوع شعله در چرخه‌های افزایشی و کاهشی  $\phi I$  است. در چرخه افزایش  $\phi I$ ، شعله V در محدوده وسیع‌تری پایدار است. در چرخه کاهش نسبت هم‌ارزی، شعله M در ابتدا کاملاً پایدار و آرام بوده و به تدریج با کاهش سوخت، سرعت شعله کاهش یافته و

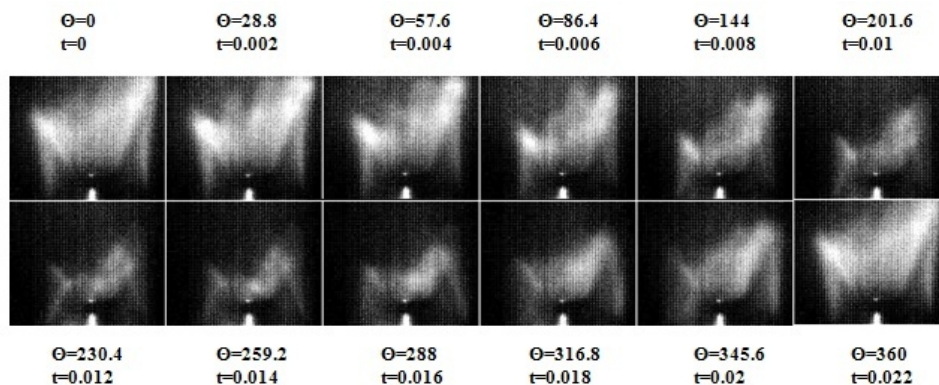


جریان از لبه‌ها جدا می‌شود. ولی در چرخه افزایش نسبت هم‌ارزی، با افزایش سوخت، سرعت شعله بیشتر شده و طول شعله نیز بلندتر می‌شود و سطح شعله افزایش می‌یابد. گردابه‌هایی که در پشت شعله قرار دارند از سر میله به بالا حرکت کرده و چون زمان بیشتری برای رشد کردن دارند لبه شعله را چروکیده کرده و شعله را آشفته می‌کنند. بنابراین شعله دیرتر از حالت  $V$ - شکل خارج شده و به  $M$  تبدیل می‌شود و شکل شعله  $V$  در محدوده وسیع‌تری از نسبت هم‌ارزی پایدار می‌ماند. 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 هواست، شعله در نسبت هم‌ارزی بالاتری ناپایدار می‌شود. از آنجا که با افزایش دبی، سرعت جریان مخلوط واکنش‌دهنده‌ها افزایش می‌یابد، در نتیجه سرعت شعله در مقایسه با حالت فشار کمتر (هنگامی که دبی جریان پایین‌تر است)، در یک نسبت هم‌ارزی یکسان، دیگر نمی‌تواند بر تاثیر سرعت جریان مخلوط واکنش‌دهنده‌ها غلبه کند. بنابراین شعله، در دبی‌های بالاتر، سریع‌تر کنده می‌شود.

نمونه نتایج به دست آمده از آزمون‌های آکوستیک برای شرایط احتراقی با نسبت هم‌ارزی  $1/2$ ، تواتر  $40$  هرتز و سرعت  $0/9$  متر بر ثانیه، در قالب تحریک شعله  $M$ - شکل، ارائه شده است. طول شعله برای این حالت معادل  $16/82$  میلی‌متر محاسبه شد. از آنجا که طول موج با معکوس تواتر متناسب است و به دلیل آنکه طول شعله کمتر از طول موج نوسان آکوستیکی است کل شعله به صورت یکپارچه بالا و پایین می‌رود و نوسان هارمونیک دارد. به عبارتی دیگر کل شعله نوسان حجمی خواهد داشت و از دیدگاه آکوستیکی یک شعله متراکم است. شکل (۵) نشان می‌دهد که شعله با وجود موج‌های مختلف، با موج غالبی که تواتر تحریک  $40$  هرتز دارد نوسان می‌کند. در شکل (۶) نوسان شعله  $M$ - شکل در یک دوره تناوب نشان داده شده است.

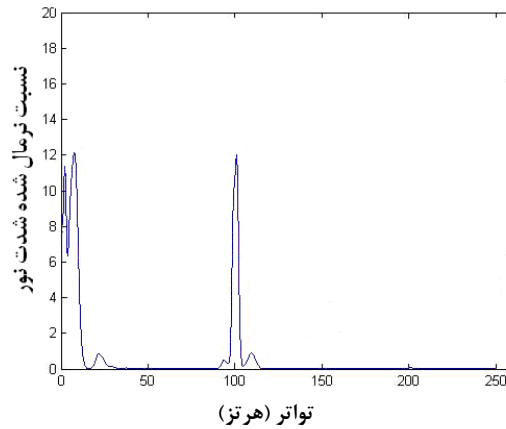


شکل ۵- شدت نور برای حالت نسبت هم‌ارزی  $1/2$ ، تواتر  $40$  هرتز و سرعت  $0/9$  متر بر ثانیه

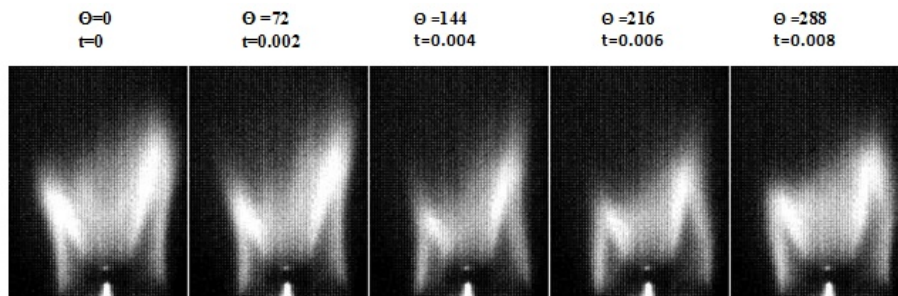


شکل ۶- نوسان شعله  $M$ - شکل در یک دوره تناوب برای حالت نسبت هم‌ارزی  $1/2$ ، تواتر  $40$  هرتز و سرعت  $0/9$  متر بر ثانیه

در ادامه، یک نمونه از نوسانات انتقالی برای شعله M- شکل در شرایط عملکردی با نسبت هم ارزی  $1/2$ ، تواتر  $100$  هرتز و سرعت  $1/54$  متر بر ثانیه ارائه شده است. در این حالت طول شعله برابر با  $2/1$  سانتی‌متر است. با توجه به شکل (7) تواتر غالب در نوسانات شدت نور معادل همان تواتر تحریک است. همچنین در شکل (8) تغییرات شکل شعله در یک دوره تناوب نمایش داده شده است.

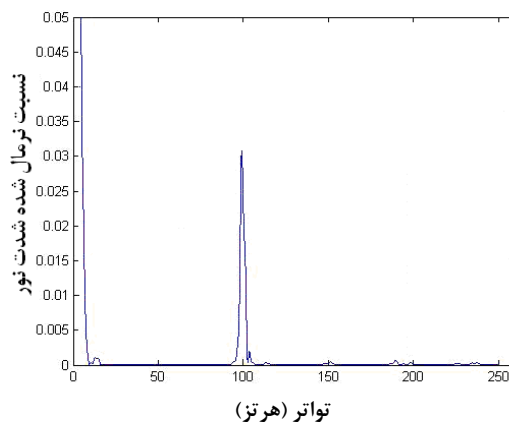


شکل 7- شدت نور برای حالت نسبت هم ارزی  $1/2$ ، تواتر  $100$  هرتز و سرعت  $1/54$  متر بر ثانیه

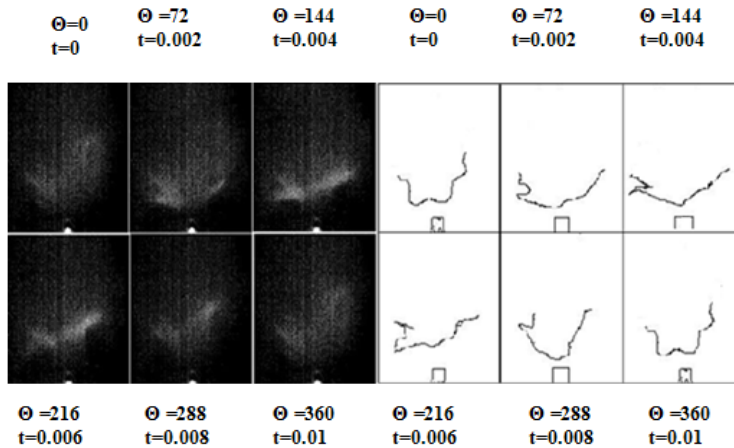


شکل 8- نوسان شعله M- شکل در یک دوره تناوب برای حالت نسبت هم ارزی  $1/2$ ، تواتر  $100$  هرتز و سرعت  $1/54$  متر بر ثانیه

برای شعله V- شکل با نسبت هم‌ارزی  $0/9$ ، تواتر  $100$  هرتز و سرعت  $0/9$  متر بر ثانیه طول شعله برابر با  $12/98$  میلی‌متر محاسبه شده است. با توجه به شکل (9)، شدت نور در تواتر  $100$  هرتز تشدید می‌شود که این نشان دهنده تحریک شعله در تواتر اعمال شده به آن است. در شکل (10) رفتار این شعله در یک دوره تناوب با اختلاف فاز  $72$  درجه نمایش داده شده است.



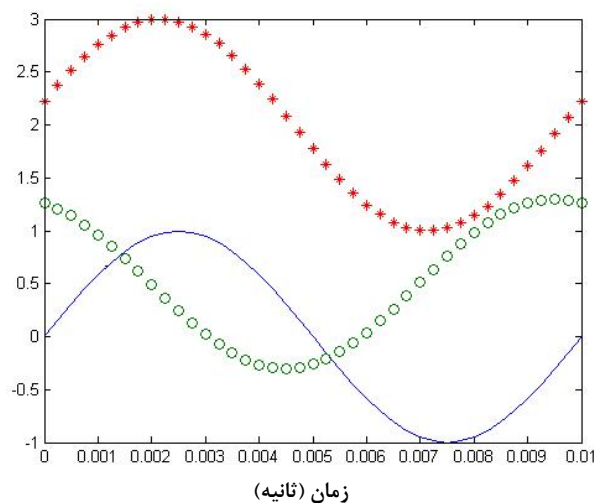
شکل 9- شدت نور برای شرایط احتراقی با نسبت هم ارزی  $0/9$ ، تواتر  $100$  هرتز و سرعت  $0/9$  متر بر ثانیه



شکل ۱۰- نوسان شعله V شکل در یک دوره تناوب برای شرایط احتراقی با نسبت هم‌ارزی ۰/۹، تواتر ۱۰۰ هرتز و سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه

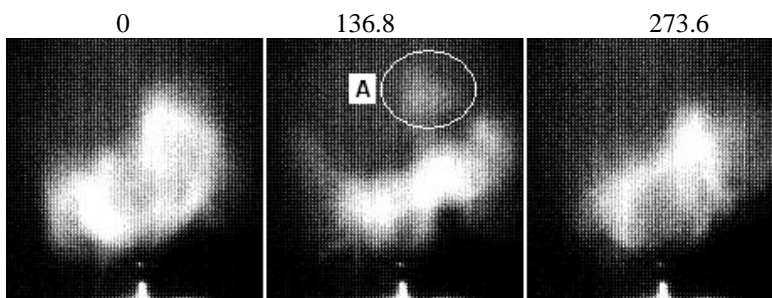
همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، در یک دوره تناوب برای تواتر ۱۰۰ هرتز (که برابر با ۰/۰۱ ثانیه است) سطح شعله تغییر می‌کند. نسبت مساحت سطح شعله که متناسب با شدت نور است تقریب خوبی برای بیان نرخ گرمای آزاد شده است. مطالعات مرتبط [۶] نشان می‌دهند که نرخ انتقال گرما زمانی که دامنه نوسانات فشار بالا می‌رود، رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد. این مقدار وابسته به تواتر نوسانات و نسبت هم‌ارزی است. سازوکار تغییر سطح شعله تحت تاثیر نحوه تولید و انتشار گردابه‌های تشکیل شده است. شعله بر اثر لایه برشی تولید شده از میله مرکزی در داخل به سختی پایدار می‌شود و در صورتی که تحت تاثیر نوسانات با دامنه بالا قرار گیرد، از حالت تعادل خارج شده، لایه برشی درونی به داخل چرخیده و باعث ایجاد گردابه می‌شود. این گردابه‌ها با سطح شعله برخورد کرده و آن را چروکیده می‌کنند. از آنجا که سطح شعله تا حدودی متناسب با شدت نور آزاد شده از شعله است، در نتیجه با کاهش سطح شعله از شدت نور آن نیز کاسته می‌شود.

در مرحله بعد، با استفاده از داده‌های دامنه و اختلاف فاز، شکل موج تغییرات شدت نور برای تواتر تحریک ۱۰۰ هرتز در یک دوره تناوب در شکل (۱۰) رسم شده است. بیشینه شدت نور هنگامی اتفاق می‌افتد که در آن نرخ انتقال گرما که متناسب با سطح شعله است افزایش یابد. همان‌طور که گفته شد، لایه برشی داخلی به هنگام چرخش به دور خود و ایجاد گردابه مقداری از مواد واکنش‌دهنده را وارد سطح شعله می‌کند که خود باعث افزایش نرخ انتقال گرما می‌شود. نتایج به دست آمده در شکل (۱۱) با نتایج شکل (۱۰) در یک دوره تناوب قابل تطبیق است.



شکل ۱۱- منحنی موج آکوستیکی فرستاده شده توسط بلندگو (خط پیوسته)، نوسانات ضبط شده توسط میکروفن (دایره کوچک) و تغییرات شدت نور (ستاره)

با توجه به شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، نرخ انتقال گرما به دلیل کاهش سطح شعله، کاهش یافته و در فازی در حدود ۲۱۶ درجه به کمترین مقدار خود می‌رسد که مربوط به محدوده زمانی  $t=0.006$  ثانیه است. بنابر مشاهدات صورت گرفته، دو دلیل برای تغییر سطح شعله قابل بیان است: ۱- انتشار گردابه‌های تولید شده در امتداد شعله باعث ایجاد برآمدگی‌هایی در جبهه شعله (Flame cusps) می‌شود که بعضاً موجب از بین رفتن و خاموشی موضعی بخشی از سطح جبهه شعله نیز می‌شوند. ۲- برخورد المان‌های همجوار شعله به یکدیگر باعث خاموشی و از بین رفتن بخشی از سطح جبهه شعله در برخی نواحی می‌شود. نتایج تجربی به دست آمده برای شرایط عملکردی با نسبت هم ارزی ۱/۲، تواتر ۱۹۰ هرتز و سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، در تواتر ۱۹۰ هرتز که در محدوده تواتر تشدید مشعل است، با در نظر گرفتن تغییرات سطح شعله در طول یک دوره تناوب، ملاحظه می‌شود که در فاز ۱۳۶/۸ درجه در ناحیه‌ای از شعله که با حرف A مشخص شده قسمتی از سطح شعله در اثر برخورد المان‌های مجاور از بین رفته و از شعله اصلی جدا شده است. مشابه این پدیده قبلاً توسط بالاجاندران و همکاران [۱۱] در بررسی دینامیک شعله پیش‌مخلوط مخروطی گزارش شده است. بنابراین گردابه‌ها با وجود اینکه باعث افزایش سطح شعله با چرخاندن شعله به دور خود می‌شوند ولی گاه نیز موجب ایجاد برآمدگی‌هایی در سطح شعله می‌شوند که باعث از بین رفتن سطح شعله و در نتیجه کاهش شدت نور آن می‌شود.



شکل ۱۲- جدایش شعله در فاز ۱۳۶/۸ درجه برای حالت نسبت هم ارزی ۱/۲، تواتر ۱۹۰ هرتز و سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه

### به دست آوردن تابع پاسخ شعله

تابع پاسخ شعله عنوان شده در رابطه (۳) تخمینی از ارتباط بین نرخ تغییرات گرمای آزاد شده و نوسانات سرعت ارائه می‌کند [۱۲]. این تابع پاسخ با مقایسه نور تشعشع یافته از رادیکال‌های  $OH^*$  و داده‌های مربوط به اغتشاشات سرعت تعیین می‌شود. فرض می‌شود که گرمای آزاد شده متناسب با شدت نور منتشر شده از شعله ( $I_{OH^*}$ ) باشد، هر چند این فرض فقط در شرایط احتراق کاملاً پیش‌مخلوط صادق است [۱۲].

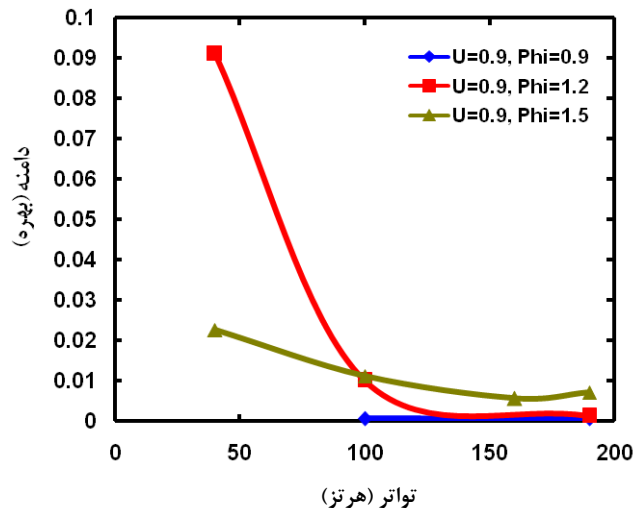
$$F(f) = (I'_{OH^*} / \bar{I}_{OH^*} / u'_1 / \bar{U}) \quad (3)$$

با محاسبه اندازه و زاویه این تابع پاسخ شعله، می‌توان بهره و فاز پاسخ را در محدوده مورد نظر از تواترهای تحریک سامانه ( $f$ ) به دست آورد. در این رابطه  $\bar{U}$  سرعت متوسط جریان،  $u'_1$  مقدار اولیه نوسانات سرعت و  $I'_{OH^*}$  و  $\bar{I}_{OH^*}$  به ترتیب مقادیر اغتشاشی و متوسط شدت نور منتشر شده از شعله هستند. از آنجا که امکان اندازه‌گیری نوسانات سرعت در مطالعه حاضر وجود نداشت، برای به دست آوردن تابع پاسخ شعله با بررسی نوسانات هارمونیک فشار در داخل محفظه، تابع پاسخ نوسانات شدت نور شعله به نوسانات فشار مطابق رابطه (۴) مورد مطالعه قرار گرفت.

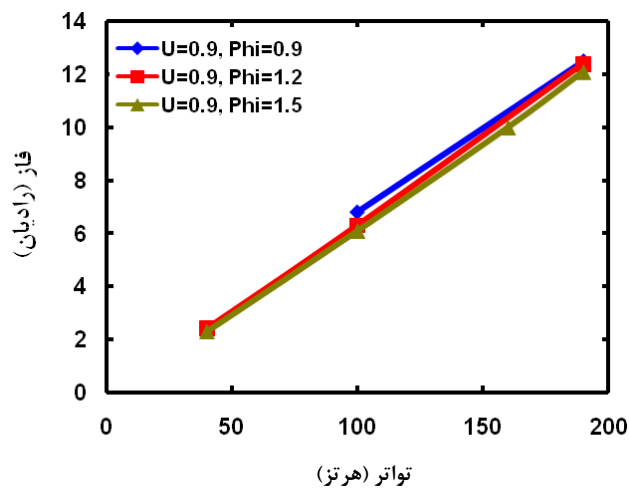
$$F(f) = (I' / \bar{I} / p' / \bar{p}) \quad (4)$$

در رابطه (۴) نوسانات نسبی در گرمای آزاد شده با اغتشاشات نسبی فشار در محفظه ( $p' / \bar{p}$ ) مقایسه شده است. همان‌طور که در بخش پردازش تصاویر ذکر شد، نوسانات شدت نور ( $I' / \bar{I}$ )، به عنوان مقیاسی از نوسانات نسبی در گرمای آزاد شده، به همراه نوسانات فشار اندازه‌گیری شد.

نتایج این اندازه‌گیری در قالب بهره و فاز تابع پاسخ شعله برای شرایط عملکردی با سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) ارائه شده است. تابع پاسخ به دست آمده رفتاری مشابه با تابع پاسخ شعله به دست آمده از نتایج تجربی بیرباد و همکاران [۷] دارد. همچنین فاز تابع پاسخ شعله نسبت به تغییرات تواتر رفتاری شبه‌خطی دارد که بیانگر وجود تاخیر فازی ثابت بین نوسانات فشار و گرمای آزاد شده است. این رفتار شبه‌خطی فاز، تطابق قابل قبولی با نتایج بررسی دورو و همکاران [۸] نشان می‌دهد. نتایج مربوط به بهره پاسخ شعله نیز نشان می‌دهد که شعله در محدوده پایین تواترهای تحریک ( $f < 75$  Hz)، حساسیت بیشتری به تغییرات نسبت هم‌ارزی دارد.



شکل ۱۳- دامنه ( بهره ) تابع پاسخ شعله برای سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه در سه نسبت هم‌ارزی ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۵



شکل ۱۴- فاز تابع پاسخ شعله برای سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه در سه نسبت هم‌ارزی ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۵

### نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر اثر نوسانات آکوستیک بر روی پاسخ شعله‌های V-شکل و M-شکل با فرض ثابت بودن سرعت شعله بررسی شده است. نتایج مربوط به تعیین محدوده پایداری شعله V-شکل و M-شکل نشان می‌دهد که شعله M محدوده پایداری

کمتری نسبت به شعله V دارد. این امر مانع از انجام آزمایش‌های تحریک آکوستیک روی شعله M- شکل در نسبت‌های هم‌ارزی پایین ( $\phi l < 0.9$ ) می‌شود. به عبارتی دیگر شعله V- شکل در محدوده وسیع‌تری از نسبت هم‌ارزی پایدار می‌ماند. گردابه‌های حاصل از نوسانات سرعت در شرایط اعمال تحریک آکوستیکی، در محدوده مشخصی از تواتر تحریک، دارای اثراتی دوگانه بر روی شعله هستند. این گردابه‌ها از یک طرف باعث افزایش سطح شعله می‌شوند و از طرف دیگر در برخی حالت‌ها به دلیل برخورد با لبه‌های شعله باعث خاموشی موضعی شعله می‌شوند. نوسانات آکوستیکی نیز باعث تغییر شکل شعله شده و نرخ گرمای آزاد شده را تغییر می‌دهند. در صورت کوپل شدن این نوسانات گرما با نوسانات آکوستیکی موجود در محفظه سطح نوسانات افزایش می‌یابد و این می‌تواند موجب بروز ناپایداری احتراق در محفظه‌های محبوس شود.

نتایج بهره پاسخ شعله نشان می‌دهد که در محدوده پایین تواترهای تحریک شعله‌ها در مقابل تغییرات نسبت هم‌ارزی حساسیت بیشتری دارند. همچنین رابطه خطی فاز پاسخ شعله با تواتر تحریک، حاکی از وجود تاخیر فازی معین بین نوسانات آکوستیک اعمالی به شعله و نوسانات گرماست. در بازه‌ای از تواترها، شعله‌های V- شکل و M- شکل مانند تقویت کننده عمل می‌کنند که این نشان دهنده حساس بودن این شعله‌ها نسبت به نوسانات است. دلیل این حساسیت در شعله M- شکل آن است که لایه‌های مجاور شعله با یکدیگر اندرکنش سریع داشته و باعث می‌شوند که نرخ گرمای آزاد شده دستخوش تغییرات شدید شود. به کمک تابع پاسخ شعله که از محاسبه نسبت نوسانات گرما بر نوسانات فشار به دست آمده می‌توان تا حدودی شرایط ناپایداری را پیش‌بینی کرد.

## منابع

1. Broda, J. C., Seo S., Santoro, R. J., Shirhattikar, G., and Yang, V., "An Experimental Study of Combustion Dynamics of a Premixed Swirl Injector," *Proceedings of the Combustion Institute*, 27, pp. 1849-1856, 1998.
2. Candel, S., "Combustion Dynamics and Control: Progress and Challenges," *Proceedings of the Combustion Institute*, 29, pp. 1-28, 2002.
3. Dowling, A. P., and Stow, S. R., "Acoustic Analysis of Gas Turbine Combustors," *Journal of Propulsion and Power*, 19, No. 5, pp. 751-764, 2003.
4. Ducruix, S., Schuller, T., Durox, D., and Candel, S., "Combustion Dynamics and Instabilities: Elementary Coupling and Driving Mechanisms," *Journal of Propulsion and Power*, 19, No. 5, pp. 722-734, 2003.
5. Bellows, B. D., and Lieuwen, T., "Nonlinear Response of a Premixed Combustor to Forced Acoustic Oscillations," *AIAA-2004-0455*, 2004.
6. Schuller, T., Durox, D., and Candel, S., "Self-Induced Combustion Oscillations of Laminar Premixed Flames Stabilized on Annular Burners," *Combustion and Flame*, 135, pp. 525-537, 2003.
7. Birbaud, A. L., Durox, D., and Candel, S., "Upstream Flow of a Laminar Premixed Conical Flame Submitted to Acoustic Modulations," *Combustion and Flame*, 146, pp. 541-552, 2006.
8. Durox, D., Schuller, T., Noiray, N., and Candel, S., "Experimental Analysis of Nonlinear Flame Transfer Functions for Different Flame Geometries," *Proceedings of the Combustion Institute*, 32, pp. 1391-1398, 2009.
9. Preetham, S. H., "Modeling the Response of Premixed Flames to Flow Disturbances," Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, 2007.
10. Lieuwen, T., "Investigation of Combustion Instability Mechanisms in Premixed Gas Turbines," Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, 1999.
11. Balachandran, R., Ayoola, B. O., Kaminski, C. F., Dowling, A. P., and Mastorakos, E., "Experimental Investigation of the Nonlinear Response of Turbulent Premixed Flames to Imposed Inlet Velocity Oscillations," *Combustion and Flame*, 143, pp. 37-55, 2005.
12. Birbaud, A. L., Durox, D., Ducruix, S., and Candel, S., "Dynamics of Confined Premixed Flames Submitted to Upstream Acoustic Modulations," *Proceedings of the Combustion Institute*, 31, pp. 1257-1265, 2007.
13. Farshchi, M., and Riazi, R., "Premixed V-shaped Flame Response to Equivalence Ratio Perturbations: Investigations on the Flame Kinematics," *Proceeding of the 7<sup>th</sup> Iranian Aerospace Society Conference*, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 2008.
14. Riazi, R., and Farshchi, M., "An Investigation on Laminar Premixed M-shaped Flame Response to Velocity Oscillations," *Proceeding of 16<sup>th</sup> International Conference on Mechanical Engineering-ISME2008*, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, 2008.

## English Abstract

# V-Shaped and M-Shaped Premixed Flame Response to Acoustic Excitations

R. Riazi, N. Nabatian and M. Farshchi

Aerospace Engineering Department, Sharif University of Technology

*An experimental study was conducted on the response of V-shaped and M-shaped premixed flames to external acoustic excitation. Low emission premixed combustors with anchored V-flames are susceptible to combustion instabilities. V-flames attach to an anchoring rod at the centre of the burner, whereas M-flames attach to the anchoring rod as well as the burner rim. This is in contrast to conical flames which are anchored only on the burner rim. As a consequence, V- and M-shaped flames are more sensitive to external flow perturbations. In the present study, a mixture of propane-air was used. The mixture equivalence ratio was changed to determine the stability range of V- and M-shaped premixed flames. The results indicated that M-shaped flames have a narrower stability range compared to that of V- flames. This limited the equivalence ratios range for acoustic excitation experiments. In order to study the flame response to external acoustic excitations, a loud speaker was placed upstream of the flame to generate acoustic waves in a certain range of frequencies. Pressure fluctuations caused by the acoustically excited flame were measured by a microphone placed downstream of the burner. Flame imaging was done with a CCD high speed camera during acoustic excitations. These images were used for flame response determination. Image processing was accomplished using the MATLAB software to obtain the amplitude and phase of the flame response. Variations of the flame shape and the intensity of light emitted by the flame were examined during a period of excitation for various values of equivalence ratios and flow rates. The results indicated that the vortex shedding and roll-up due to the velocity perturbations play an important role on the flame response. The phase response of flames evolves quasi-linearly with excitation frequency, indicating a certain time delay for the fluctuations to reach the flame surface. Also, in a certain range of excitation frequency, the flame gain response exhibits more sensitivity to variation of the equivalence ratio. Observations of the V- flame behavior during a period of excitation have led to determination of the effects of nonlinear parameters on the flame response.*

**Keywords:** V-shaped flame, M-shaped flame, Flame response function, Equivalence ratio