

تحلیل تجربی ناپایداری‌های ترمو- آکوستیکی و اندرکنش مدهای نوسانی در شعله‌های پیش مخلوط رقیق با استفاده از تکنیک پردازش تصویر

نجمه حاجی‌علی‌گل*

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، n.hajialigol@hut.ac.ir
*نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۳، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۳/۰۸/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰)

مطالعه حاضر به بررسی برخی پدیده‌های گذرا که در زمینه ترموآکوستیک ناپایدار در یک محفظه احتراق با قدرت تقریبی ۱۰ کیلووات در مقیاس آزمایشگاهی روی می‌دهد، می‌پردازد. سوخت مورد بررسی متان با سرعت ورودی ثابت است و نسبت هم‌ارزی از ۰/۷ تا ۰/۸۷ تغییر می‌کند. جریان احتراقی آشفته به دو صورت پیش‌مخلوط کامل و ناقص انجام شده است و شعله به وسیله چرخش حاصل از چرخاننده و جسم مانع، پایدار شده است. در این تحقیق، از طریق گسترش طول پایین دست مجرا، نوسانات ترموآکوستیکی القا شده است و طیف‌های OH منتشر شده از شعله در فرکانس ۵ کیلوهرتز با استفاده از یک دوربین سرعت بالا، عکس برداری شده است. به‌طور هم‌زمان، نوسانات فشار در دو موقعیت مختلف در بالادست شعله اندازه‌گیری می‌شود. شروع عکس‌برداری و اندازه‌گیری حداقل ۳۰ ثانیه پس از آغازش شعله صورت می‌گیرد. دامنه محدود (limit cycle) تک فرکانس، در نسبت‌های هم‌ارزی کم و یا برای طول کوچک مجرای پایین‌دست مشاهده شد. هم‌چنین مشاهده شد که با افزایش اندکی در نسبت هم‌ارزی یا افزایش طول مجرای پایین‌دست، مد دوم در طیف فشار ظاهر می‌شود. مد دوم ایجاد شده در مقایسه با مد اول، فرکانس کوچکتری دارد که با زمان رشد کرده و در نهایت مد حاکم بر نوسانات می‌شود. این حالت در بیشتر موارد آزمایش شده، با بازگشت شعله به سمت بالادست جریان، همراه است. آنالیز تصاویر OH نیز چنین رفتاری از شعله را نشان می‌دهد. در طیف‌های OH انتگرال‌گیری شده، قله‌هایی شبیه به آنچه در طیف فشار مشاهده شد، وجود دارد. هم‌چنین در این نمودارها، قله‌هایی به‌صورت ترکیب خطی از دو قله اصلی مشاهده شد. بررسی طیف‌های OH حاکی از آن است که در ناحیه نزدیک به پایه شعله و اطراف جسم مانع، این طیف تنها دارای دو قله کم ارتفاع است. با گسترده‌گی شعله به سمت پایین دست، تعداد و ارتفاع این قله‌ها افزایش می‌یابد. این نوع رفتار در هر دو حالت پیش‌مخلوط کامل و ناقص مشاهده شد. این رفتار نشان‌دهنده یک رفتار غیرخطی در طیف‌هاست. علاوه بر موارد گفته شده، این تحقیق به دنبال یافتن پاسخ شعله به تحریک چندفرکانسی از طریق یک روش پردازش تصویر جدید است. این روش این امکان را می‌دهد تا رفتارهای پیچیده‌تر و دقیق‌تری از شعله در شرایط مختلف بررسی شود و به درک بهتری از پدیده‌های ترموآکوستیکی ناپایدار دست یافت.

کلیدواژگان: محفظه احتراق، ناپایداری، پیش‌مخلوط، ترموآکوستیکی.

مقدمه

دینامیک شعله از مهم‌ترین مباحث در زمینه ناپایداری‌های ترمو-آکوستیکی در محفظه‌های احتراق پیش‌آمیخته است [۱]. تاکنون تحقیقات گسترده تجربی و تئوری در این زمینه انجام شده است [۱-۳]. بیشتر مطالعات مرتبط با این موضوع به مسئله تابع انتقال شعله پرداخته‌اند [۴-۶]. در این روش، که از نظریه کنترل خطی الهام گرفته است و پاسخ حرارتی شعله به نوسانات سرعت با دامنه کم در یک فرکانس خاص، مشخص می‌شود. برای ارزیابی پاسخ فرکانس شعله، این فرآیند در محدوده وسیعی از فرکانس‌های حاکم تکرار می‌شود [۷]. از توابع انتقال بدست آمده برای پیشگویی ناپایداری‌های ترمو-آکوستیکی در سایر

محفظه‌های احتراق می‌توان استفاده نمود [۸]. سپس از این مدل می‌توان برای انجام آنالیز پایداری خطی بهره‌مند شد [۸]. لازم به ذکر است که با افزودن برخی عناصر و پارامترهای غیرخطی به تابع انتقال، می‌توان آن‌را به پاسخ دینامیک غیرخطی تبدیل نمود [۹].

روش‌های مشابهی برای مطالعه دینامیک غیرخطی شعله در سال‌های اخیر معرفی شده است. این امر از طریق بسط آنالیز تابع انتقال به آنالیز توصیف شعله انجام گرفت [۱۰-۱۲]. این بسط در واقع با در نظر گرفتن هم فرکانس و هم دامنه تحریک، روشی غیرخطی محسوب می‌شود [۱۳]. مشابه با رویکرد تابع انتقال، تابع توصیف‌گر شعله، فرض را بر آن می‌دارد که سیستم به هر اختلال تنها در فرکانس ورودی پاسخ می‌دهد و مابقی طیف ورودی را نادیده می‌انگارد [۱۳]. کاملاً روشن است که چنین فرضیه‌ای می‌تواند به آسانی در یک سیستم غیرخطی نقض شود و به‌کارگیری آنالیز توصیف شعله برای سیستم‌های غیرخطی مورد انتقاد قرار گرفته است [۱۴-۱۷].

رویکرد در حال تکامل در تحلیل ناپایداری ترمو-آکوستیکی نظر جامع‌تری را در برمی‌گیرد، که در آن دینامیک شعله مستقیماً درون سیستم ناپایدار ترمو-آکوستیکی ارزیابی می‌شود. این امر اجازه بررسی ویژگی‌های غیرخطی کامل از دینامیک شعله را می‌دهد. تاکنون این رویکرد تنها بر پیکربندی‌های نسبتاً ساده اعمال شده است [۱۸، ۱۹]، در حالی که تحقیق برای موارد دیگر با پیکربندی پیچیده‌تر ادامه دارد [۲۰].

در سال‌های اخیر، تحقیقات جدیدی در زمینه دینامیک شعله و ناپایداری‌های ترمو-آکوستیکی انجام شده است که به بررسی رفتار شعله در شرایط مختلف پرداخته‌اند. به عنوان مثال، مطالعه‌ای تجربی بر روی رفتار دینامیکی شعله‌های جریان متقابل تحت تأثیر تحریکات آکوستیکی انجام شده است که نتایج مهمی در زمینه ناپایداری‌های احتراق ارائه داده است [۲۱]. این تحقیقات نشان داده‌اند که تحریکات آکوستیکی می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر پاسخ شعله و ناپایداری‌های ترمو-آکوستیکی داشته باشند.

همچنین، تحقیقات دیگری به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مانند ترکیب سوخت، فشار و دما بر دینامیک شعله پرداخته‌اند. این مطالعات نشان داده‌اند که تغییرات در این پارامترها می‌توانند به طور قابل توجهی بر رفتار شعله و ناپایداری‌های ترمو-آکوستیکی تأثیر بگذارند [۲۲]. به عنوان مثال، افزایش فشار می‌تواند منجر به افزایش ناپایداری‌های ترمو-آکوستیکی شود، در حالی که تغییرات در ترکیب سوخت می‌تواند به بهبود پایداری شعله کمک کند.

رویکردهای جدیدی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی دینامیک شعله و ناپایداری‌های ترمو-آکوستیکی معرفی شده‌اند که از تکنیک‌های پیشرفته محاسباتی و الگوریتم‌های هوش مصنوعی بهره می‌برند. این رویکردها امکان پیش‌بینی دقیق‌تر و بهینه‌سازی سیستم‌های احتراق را فراهم می‌کنند و می‌توانند به کاهش ناپایداری‌های ترمو-آکوستیکی و بهبود کارایی سیستم‌های احتراق کمک کنند [۲۳]. این تحقیقات نشان می‌دهند که دینامیک شعله و ناپایداری‌های ترمو-آکوستیکی همچنان یک زمینه پژوهشی فعال و پرچالش است که نیازمند تحقیقات بیشتر و توسعه روش‌های جدید برای بهبود درک و کنترل این پدیده‌ها است. این تحقیقات نشان می‌دهند که دینامیک شعله و ناپایداری‌های ترمو-آکوستیکی همچنان یک زمینه پژوهشی فعال و پرچالش است که نیازمند تحقیقات بیشتر و توسعه روش‌های جدید برای بهبود درک و کنترل این پدیده‌ها است.

در یک مطالعه تجربی، اثر افزودن هیدروژن به شعله جریان متقابل پیش‌آمیخته جزئی متان-هوا بررسی شده است. نتایج نشان داد که با افزایش هیدروژن، شدت تابش رادیکال CH* در حالت بدون تحریک آکوستیک کاهش می‌یابد، اما در مواجهه با امواج آکوستیک، دامنه نوسانات نرخ آزادسازی حرارت و شدت تابش رادیکال CH* افزایش می‌یابد [۲۴].

مطالعه ساختار شعله متان-هیدروژن در مشعل پیچشی سیدنی با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار OpenFOAM انجام شده است. نتایج نشان داد که افزودن هیدروژن به متان می‌تواند منجر به افزایش دما و تغییرات در ساختار شعله شود. همچنین، این مطالعه نشان داد که مدل‌های آشفته‌گی مختلف می‌توانند تأثیرات متفاوتی بر نتایج شبیه‌سازی داشته باشند [۲۵].

حاجی‌علی‌گل [۲۶] به کمک دینامیک سیالات محاسباتی و استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM به بررسی تحلیل صدای حاصل از احتراق با تغییر سرعت ورودی محفظه در شعله پیش‌مخلوط مغشوش رقیق پرداخت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد بیشترین مقدار اضمحلال و پراکندگی موج آنتروپی در فرکانس تحریک رخ می‌دهد. فرکانس تحریک، فرکانس تعیین‌کننده سیستم است و انرژی عمده سیستم در آن حضور دارد و تحت بیشترین اثرات هیدرودینامیکی قرار می‌گیرد. با افزایش فرکانس تحریک، درصد اضمحلال و پراکندگی موج آنتروپی افزایش یافت، از این رو، احتمال حضور این امواج در فرکانس‌های کوچک‌تر بیشتر است. با افزایش فاصله از بالادست جریان، اضمحلال و پراکندگی موج آنتروپی افزایش یافت. مشاهده شد با افزایش سرعت ورودی از میزان اضمحلال و پراکندگی موج آنتروپی کاسته و بر اندازه موج آکوستیکی بازتاب شده و صدای آنتروپی افزوده خواهد شد. نتایج نشان داد زمانی که شرط مرزی دیواره از آدیاباتیک به انتقال حرارت همرفتی تغییر پیدا می‌کند، اثرات انتقال حرارت همرفتی بر دیواره‌ها موجب تخریب بیشتر موج در محفظه می‌شود.

تجزیه و تحلیل صدای حاصل از احتراق محفظه احتراق توربین گازی با سوخت هیدروژن/ اتلین: بهینه‌سازی یادگیری ماشین توسط حاجی‌علی‌گل و همکاران [۲۷] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بین متغیرهای تحت بررسی و پاسخ صوتی محفظه احتراق همبستگی وجود دارد. ملاحظه شد که افزایش نسبت هم‌ارزی و دمای مخلوط ورودی به پاسخ صوتی محفظه احتراق را افزایش می‌دهد. این نتایج نشانگر آن است که نسبت تعادلی بیشتر، و افزایش دمای ورودی، ایجاد و انتشار صدای آنتروپی را تقویت می‌کند. از سوی دیگر، این تحقیق نشان داد که افزایش شدت آشفته‌گی ورودی باعث از بین رفتن امواج آنتروپی می‌شود و صدای احتراق غیرمستقیم را کاهش می‌دهد.

اگرچه با داشتن تابع انتقال شعله به عنوان یک ابزار مهندسی، گسترش روش‌های جایگزین ممکن است کاری بیهوده به نظر برسد، مقاله حاضر به ارائه یک سری نتایج آزمایشگاهی می‌پردازد که در آن‌ها نوسان‌های دارای چند مد، نقش مهمی در برخوردهای غیرخطی در یک سیستم ناپایدار ترموآکوستیکی ایفا می‌کنند. پیش‌بینی چنین برخوردهای غیرخطی، از طریق آنالیز تابع توصیف انتقال امکان‌پذیر است. چنین پدیده غیرخطی ممکن است تحت شرایط کارکرد مختلف و اثرات گذرای سیستم، ایجاد شود. به منظور بررسی مساله متوسط‌گیری از فاز تصویر، یک روش جدید پردازش تصویر معرفی می‌شود.

روش آزمایشگاهی

در این مطالعه یک محفظه احتراق در مقیاس کوچک با قدرت ۱۰ کیلووات مورد استفاده قرار گرفته است. نمای کلی این محفظه در شکل ۱ نشان داده شده است. این محفظه شامل یک مجرای دایره‌ای شکل به طول ۳۰۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۳۵ میلی‌متر است. به منظور پایدار کردن شعله، یک جسم مانع^۱ به صورت مخروطی شکل با قطر ۲۵ میلی‌متر در مرکز مجرا قرار داده شده است. این باعث نسبت انسداد ۵۰ درصد می‌شود، که منجر به پایداری شعله می‌شود. نسبت انسداد به درصد مساحت مقطع عرضی مجرا که توسط جسم مانع مسدود شده است، اشاره دارد. در این مطالعه، جسم مانع مخروطی شکلی با قطر ۲۵ میلی‌متر در مرکز مجرا قرار داده شده است که قطر داخلی آن ۳۵ میلی‌متر است. این باعث می‌شود که نسبت انسداد ۵۰ درصد باشد. نسبت انسداد بالا می‌تواند به پایداری شعله کمک کند، زیرا جریان هوا را به سمت جسم مانع هدایت کرده و باعث ایجاد ناحیه‌ای با سرعت کم در پشت جسم مانع می‌شود که برای پایداری شعله مناسب است. طول مجرا می‌تواند تأثیر زیادی بر رفتار جریان و پایداری شعله داشته باشد. در این تحقیق، طول ناحیه بالاتر از جسم مخروطی تا ۵۰۰ میلی‌متر افزایش یافته است. این تغییرات طول می‌تواند به دلایل زیر مهم باشد:

۱. زمان اقامت جریان: افزایش طول مجرا زمان بیشتری برای اختلاط و واکنش سوخت و هوا فراهم می‌کند که می‌تواند به بهبود پایداری شعله کمک کند.

۲. تأثیرات آکوستیکی: طول مجرا می‌تواند بر روی فرکانس‌های طبیعی سیستم تأثیر بگذارد و در نتیجه بر رفتار ترموآکوستیکی

¹Bluff-body

شعله تأثیرگذار باشد. طول‌های مختلف می‌توانند به شناسایی و کنترل ناپایداری‌های آکوستیکی کمک کنند.
۳. پروفیل دما و سرعت: طول مجرا می‌تواند بر روی پروفیل دما و سرعت جریان تأثیر بگذارد که این نیز به نوبه خود بر پایداری و کارایی احتراق تأثیرگذار است.

برای اطمینان از ایجاد شعله‌ای پایدارتر، یک چرخاننده جریان با زاویه ۶۰ درجه نیز به فاصله ۴۵ میلی‌متر از لبه جسم مانع در مسیر ورودی قرار داده شد. این چرخاننده جریان به منظور ایجاد جریان گردابی در ورودی محفظه طراحی شده است. جریان گردابی باعث می‌شود که اختلاط سوخت و هوا بهبود یابد و ناحیه‌ای با سرعت کم در پشت جسم مانع ایجاد شود که به پایداری شعله کمک می‌کند. این طراحی به ویژه در شرایطی که ناپایداری‌های آکوستیکی ممکن است رخ دهد، اهمیت دارد، زیرا جریان گردابی می‌تواند به کاهش این ناپایداری‌ها کمک کند و شعله‌ای پایدارتر و یکنواخت‌تر ایجاد کند. دو فشارسنج به فاصله محوری ۱۵۰ میلی‌متر از هم برای اندازه‌گیری فشار آکوستیک بر روی مجرا قرار گرفتند. جریان گاز سرد از یک محفظه استوانه‌ای^۱ با طول ۲۰۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۱۰ میلی‌متر فراهم می‌شود. به منظور ایجاد جریان یکنواخت، صاف‌کننده‌ایی در مسیر مخلوط گاز ورودی به کار برده شد. این مشعل در تحقیق دیگری برای مطالعه روی دینامیک غیرخطی شعله به کار برده شده است [۲۷]. دبی جرمی سوخت (متان) و هوا به صورت کنترل شده با دبی‌سنج با بیشینه دبی به ترتیب ۱۰۰ و ۱۵۰۰ لیتر بر دقیقه اندازه‌گیری و کنترل شد. بخش اصلی مورد مطالعه مشعل شامل یک مجرا از جنس کوارتز با قطر داخلی ۷۰ میلی‌متر و طول ۲۰۰ میلی‌متر است. این طول با استفاده از لوله‌های از جنس برنج با قطر داخلی مشابه با لوله کواتز، اضافه می‌شود. به منظور مطالعه اثر طول‌های مختلف مجرای قسمت اصلی با داشتن قطر ثابت ۷۰ میلی‌متر، طول ناحیه بالاتر از جسم مخروطی، در پایین دست شعله، تا ۵۰۰ میلی‌متر افزایش یافت (شکل ۱).

در این تحقیق مخلوط به دو صورت پیش‌مخلوط کامل و ناقص در نظر گرفته شده است. هنگامی که پیش‌مخلوط به صورت کامل است، هوا و سوخت قبل از ورود به محفظه با یکدیگر به طور کامل مخلوط می‌شوند (شکل ۱). در حالت احتراق پیش‌مخلوط ناقص، سوخت تحت فشار از طریق مجرای دایره‌ای شکل و از ناحیه میانی جسم مانع، وارد محفظه می‌شود. در ۵۵ میلی‌متری بالادست لبه جسم مانع، شش سوراخ به قطر ۲۵ میکرومتر با فواصل مساوی از هم برای ورود جریان سوخت در این حالت بر روی مجرای دایره‌ای قرار داده شده است. جریان سوخت به داخل هوا تزریق شده و درون مجرا جریان می‌یابد (شکل ۱). به دلیل زمان کوتاه برای ترکیب هوا و سوخت، مخلوط به صورت ناقص، پیش‌آمیخته شده و به ناحیه واکنشی می‌رسد.

سرعت متوسط جریان سرد در لبه جسم مانع در تمامی آزمایش‌های صورت گرفته ۱۰ متر بر ثانیه بوده است. نسبت هم‌ارزی از ۰/۷۰ تا ۰/۸۷ متغیر در نظر گرفته شده است. سیستم در هر دو حالت مورد بررسی پیش‌آمیخته کامل و ناقص، از لحاظ ترموآکوستیکی ناپایدار است. به دلیل امکان بازگشت شعله به دلیل افزایش دامنه نوسانات با افزایش نسبت هم‌ارزی، یک سطح سوراخ‌دار درست بالای چرخاننده افزوده شد تا بتواند از این بازگشت جلوگیری کند. فشار به کمک دوددد فشارسنج که در بالا دست مجرا قرار گرفته‌اند، اندازه‌گیری می‌شود. به منظور تبدیل داده‌های تجربی به سیگنال دیجیتال از یک تبدیل‌کننده استفاده شده است. خروجی تبدیل‌کننده توسط نرم‌افزار لب ویو^۲ دریافت شده و بصورت فایل در رایانه ذخیره می‌شود. اندازه‌گیری فشار به مدت ۱۰ ثانیه انجام شده است.

تشعشع^۳ رادیکال OH^* شعله توسط یک دوربین فوترون^۴ با سرعت تصویربرداری ۵۰۰۰ هرتز برای مدت یک ثانیه تصویربرداری شده است. این کار در طی مراحل اندازه‌گیری فشار انجام شده است. اندازه‌گیری‌ها در حداقل ۳۰ ثانیه پس از آغازش^۵ شعله شروع شده است. این تأخیر بین آغازش و شروع اندازه‌گیری، در آزمایش‌های مختلف بین ۶۰ تا ۹۰ ثانیه تغییر کرده است.

^۱Plenum chamber

^۲Labview

^۳Chemiluminescence

^۴Photron

^۵Ignition

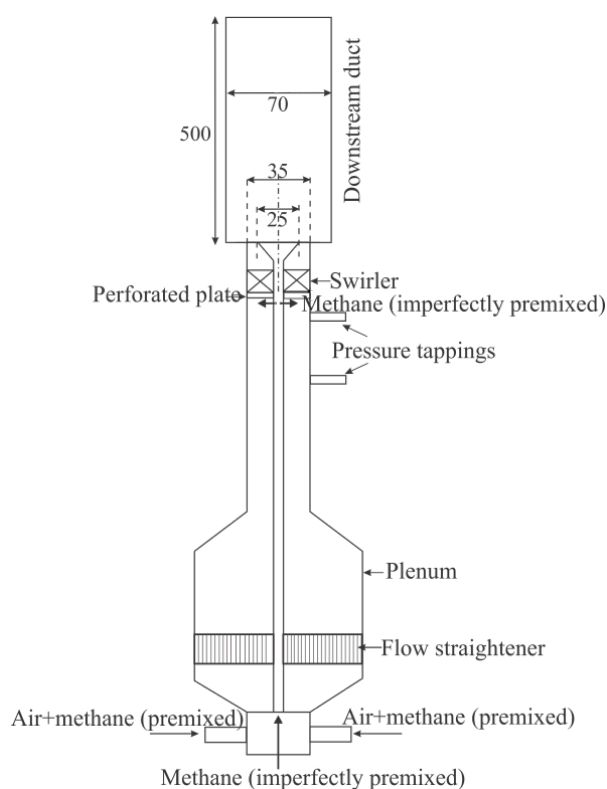


Figure 1- Schematic of the combustion rig

شکل ۱- طرح‌واره محفظه احتراق

تکنیک پردازش تصویر

به منظور داشتن یک سیگنال گذرا، شدت نور بر روی هر تصویر انتگرال‌گیری شده است. این کار برای تمام تصاویر تکرار شد. سیگنال به دست آمده را می‌توان متناسب با نرخ کلی گرمای آزاد شده دانست. در برخی شرایط کارکردی، ناپایداری ترمو-آکوستیکی شامل مدهای مختلفی با فرکانس‌های کاملاً متفاوت است که این منجر به ایجاد شعله با شکل پیچیده می‌شود (شکل ۲). رفتار نوسانی و نامنظمی که به شدت تابع زمان است، در ظاهر شعله و همچنین در OH^* انتگرال‌گیری شده قابل مشاهده است (شکل ۳). به دلیل همین رفتار نامنظم زمانی، اطلاعات فاز به شدت تابع زمان می‌باشند. از این رو یافتن اطلاعات متوسط‌گیری شده از فاز، در این شرایط بسیار دشوار است. در این مقاله یک تکنیک جدید پردازش تصویر معرفی می‌شود. این تکنیک مشابه روشی است که توسط هاوسر^۱ و همکارانش [۲۸] به کار گرفته شده است. روش حاضر مبتنی بر به کارگیری تبدیل فوری تصاویر شعله است. شدت نور در هر پیکسل، با یک عدد در یک محدوده خاص، بیان می‌شود. بنابراین، شدت نور یک پیکسل خاص برای تمام عکس‌ها، یک سیگنال مشخصی است که می‌توان از آن تبدیل فوری گرفت. طیف حاصله سپس با طیف فشار مقایسه می‌شود. عموماً قله‌ای در طیف فشار مشخص می‌شود و همان فرکانس در طیف شدت نور در نظر گرفته می‌شود. سپس دامنه و اطلاعات فازی سیگنال فشار در این نقطه اقتباس می‌شوند. این فرآیند برای تمامی پیکسل‌ها در تصاویر برداری، به صورت پیوسته تکرار می‌شود. بنابراین برای هر عکس از شعله، دو ماتریس که دارای ردیف‌ها و ستون‌های یکسانی هستند، بوجود می‌آیند. این ماتریس‌ها حاوی اطلاعات فاز و دامنه نوسانات شدت OH^* در یکی از نوسانات فشاری می‌باشند.

¹Hauser

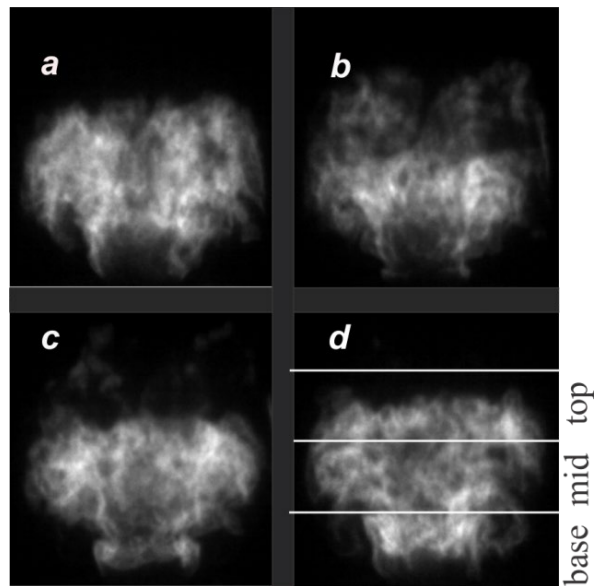


Figure 2- Typical chemiluminescence images of thermo-acoustically unstable flame, premixed, $\phi=0.79$, time difference between each image is 600 ms, part d shows the three flame slices

شکل ۲- تصاویر (OH* chemiluminescence) شعله ناپایدار ترمو-آکوستیکی پیش مخلوط، با نسبت هم ارزی $\phi = 0.79$. بازه زمانی در هر عکس برداری ۶۰۰ ms و بخش d نشان دهنده سه برش از شعله است.

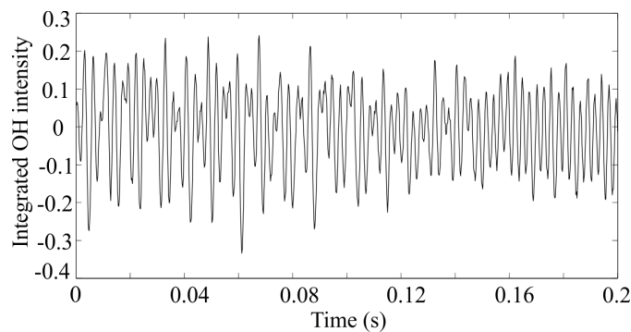


Figure 3- Integrated OH* intensity trace, premixed, $\phi=0.79$

شکل ۳- تغییر زمانی OH* انتگرال گیری شده برای شعله پیش مخلوط و نسبت هم ارزی $\phi = 0.79$

با پیمایش مناسب اطلاعات هر ماتریس را می توان در یک تصویر با همان سایز تصاویر شعله نشان داد. قسمت های a و b از شکل ۴، نشان دهنده تصاویر دامنه^۱ و فاز بدست آمده با این روش است. از قسمت b شکل ۴ مشخص است که تفسیر فاز به دلیل وجود فاز تصادفی در خارج از ناحیه واکنش، دشوار است. به منظور رفع این مشکل، تصاویر دامنه و فاز با یکدیگر ترکیب شده و در قالب شکل ۴ قسمت c به صورت یک تصویر دوبعدی نشان داده شده است. رنگها در این شکل نشان دهنده فازها و سطح تاریکی بیانگر دامنه نسبی نوسانات می باشند.

¹Magnitude

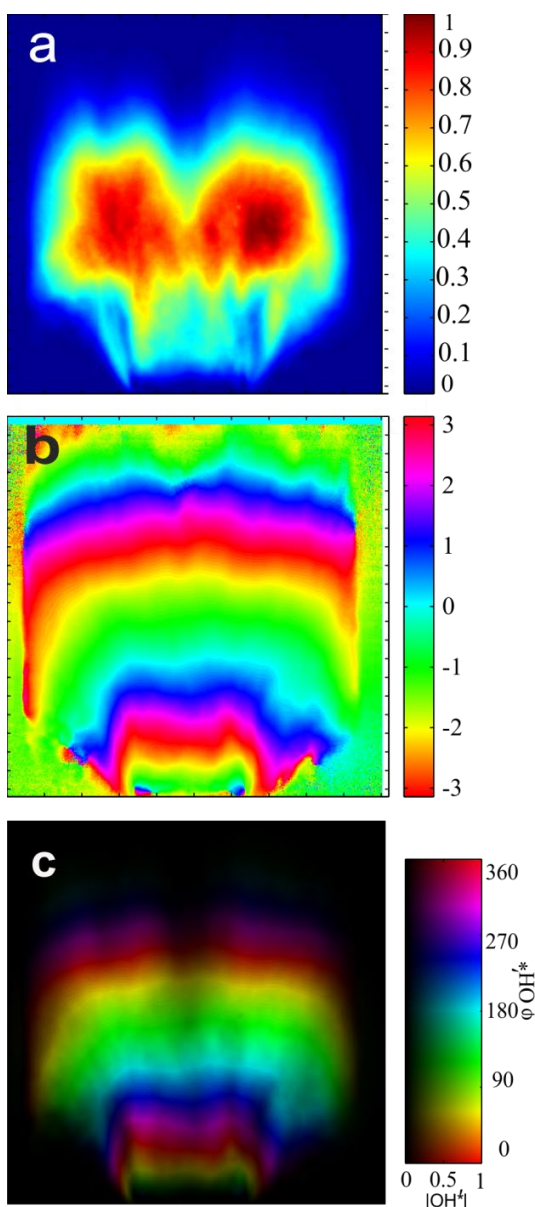


Figure 4- Image processing technique, a) magnitude image, b) phase image (in radiant), c) combined magnitude and phase image, premixed, $\phi=0.79$ and frequency of 381 Hz.

شکل ۴- روش پردازش تصویر: a- تصویر دامنه، b- تصویر فاز، c- ترکیب دامنه و فاز برای شعله پیش مخلوط

با نسبت هم‌ارزی $\phi=0.79$ و فرکانس ۳۸۱Hz.

نتایج و بحث‌ها

تصاویر a-۵ و b-۵ نشان‌دهنده طیف‌های OH^* انتگرال‌گیری شده و فشار برای شعله پیش‌مخلوط با نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵ است. هر دو شکل یک قله در محدوده فرکانسی ۳۸۰ هرتز را نشان می‌دهند. این یک دامنه محدود (limit cycle) پایدار بوده و تغییرات تأخیر بین آغازش شعله و تصویربرداری، تأثیر چشمگیری در این طیف‌ها ندارد. رفتار طیف‌ها در سایر نسبت‌های هم‌ارزی کمتر از ۰/۷۶ نیز تقریباً به همین‌گونه است. اما در نسبت هم‌ارزی ۰/۷۷ تغییراتی در طیف‌ها، ایجاد شده است (شکل‌های ۶ و ۷). در این نسبت هم‌ارزی، دامنه نوسانات با زمان رشد کرده و در نهایت منجر به بازگشت شعله می‌شود. این فرآیند شامل تولید مدهای نوسانی جدید نیز است.

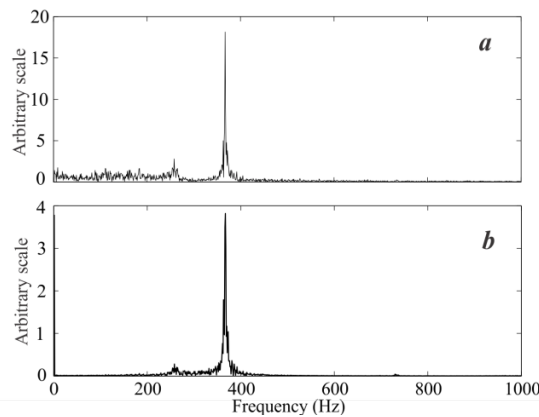


Figure 5- a) overall heat release b) pressure spectrum, premixed, $\phi=0.75$.

شکل ۵- a- گرمای کلی آزاد شده و b- طیف فشار برای شعله پیش مخلوط با نسبت هم‌آزری $\phi=0.75$.

شکل ۶ نشان‌دهنده طیف فشار و گرمای آزاد شده در ۶۰ ثانیه پس از آغازش شعله است. مشابه با نتایج نسبت هم‌آزری کم، در این شکل نیز قله‌ای در حدود ۳۸۰ هرتز مشاهده می‌شود. در این شکل یک مد جدید نوسانی در فرکانس ۲۶۰ هرتز نیز مشاهده می‌شود. به‌علاوه در نمودار طیف گرمای آزاد شده (شکل ۶- a) دو قله حاصل از ترکیبات خطی از این فرکانس‌ها مشاهده می‌شود. این، به‌روشنی، نشانه‌ای از اندرکنش^۱ غیرخطی بین این دو مد نوسانی است. آزمایش‌های انجام شده با تأخیر ۹۰ ثانیه‌ای بین آغازش شعله و تصویربرداری منجر به نتایج متفاوتی از طیف‌ها می‌شود (شکل ۷). شکل ۷ نشان می‌دهد که در مقایسه با فرکانس‌های دیگر، نوسانات در فرکانس پایین ۲۶۰ هرتز رشد سریع‌تری دارند. سایر مدها توسط اندرکنش بین دو فرکانس اصلی حاصل می‌شود. فرکانس این مدها ترکیب خطی از فرکانس مدهای اصلی است. برگشت شعله در کمتر از ۱۰ ثانیه اتفاق می‌افتد. به نظر می‌رسد که بازگشت شعله را می‌توان به تأثیرات قوی ناپایداری^۲ نوسانات، در فرکانس پایین (۲۶۰ هرتز) نسبت داد. مشاهده می‌شود که اندرکنش میان مدها در طیف گرمای آزاد شده بیشتر مشهود است. هرچند فعل و انفعال میان آن‌ها در طیف فشار کمتر دیده می‌شود.

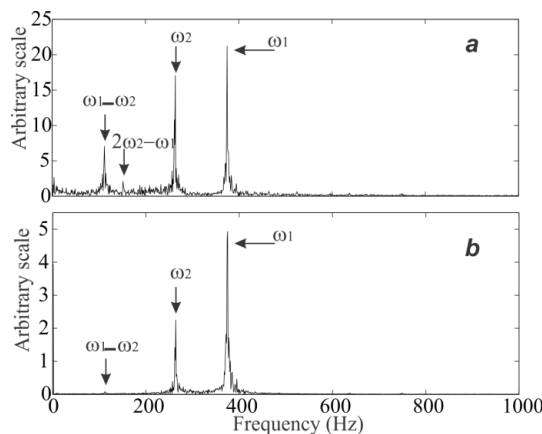


Figure 6- a) overall heat release spectrum b) pressure spectrum, $\phi=0.77$, premixed, 60 seconds after ignition.

شکل ۶- a- طیف گرمای آزاد شده کلی و b- طیف فشار برای شعله پیش مخلوط با نسبت هم‌آزری $\phi=0.77$.
عکس‌برداری ۶۰ ثانیه پس از آغازش شعله.

¹Interaction
²Destabilising

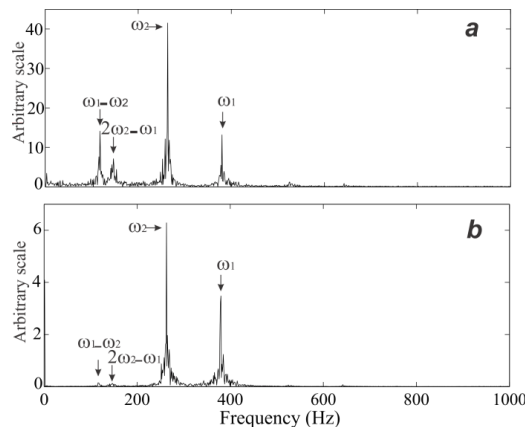


Figure 7- a) overall heat release spectrum b) pressure spectrum, $\phi=0.77$, premixed, 90 seconds after ignition, just before flame flashback

شکل ۷- a: طیف گرمای آزاد شده کلی و b- طیف فشار برای شعله پیش مخلوط با نسبت هم ارزی $\phi = 0.77$ عکس برداری ۹۰ ثانیه پس از آغازش، دقیقاً قبل از بازگشت شعله

اثرات مکانی این مدهای نوسانی بر شعله نیز از نظر تئوری بسیار مهم است. شکل ۲ نشان می‌دهد که پاسخ شعله شامل پف کردن گازهای واکنشی (شکل ۲-b)، گردابه‌ها (شکل ۲-c) و انتقال گردابه‌ها است. برای بررسی بیشتر این مکانیزم‌ها تصاویر عکس برداری شده شعله به سه بخش تقسیم شده‌اند. تصاویری تولیدی، نشان دهنده پایه شعله، بلافاصله در قسمت پایینی جسم مانع، میانه شعله و بخش پایین دست شعله است (شکل ۲-d). با انتگرال گیری از شدت OH^* در تصاویر، شدتی معادل با مقدار گرمای آزاد شده تولید می‌شود. شکل ۸ قسمت‌های c تا e نمایانگر طیف حرارت آزاد شده با این روش می‌باشند. طیف‌های حرارت آزاد شده و فشار، در قسمت‌های a و b از شکل ۸ نشان داده شده‌اند.

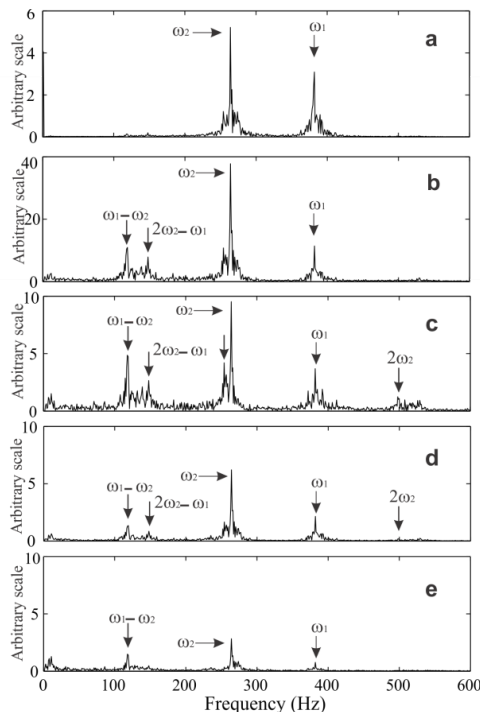


Figure 8- a) pressure spectrum b) overall heat release spectrum, integrated OH^* spectrum for c) top section d) middle section, e) base section of the flame image, $\phi=0.79$, premixed.

شکل ۸- a- طیف فشار، b- طیف گرمای آزاد شده کلی، طیف OH^* انتگرال گیری شده برای c- قسمت بالایی، d- بخش میانی، e- پایه شعله برای شعله پیش مخلوط کامل با نسبت هم ارزی $\phi = 0.79$.

از تصویر ارائه شده در شکل ۸-ع مشخص است که در پایه شعله، فقط مدهای اصلی و اندرکنش میان آن‌ها قابل توجه است. در ناحیه میانی شعله، شکل ۸-د، مدهای نوسانی بیشتری مشاهده می‌شود و بخش بالایی شعله به دلیل اندرکنش بیشتر میان مدهای اصلی، نوسان‌های بیشتری را نشان می‌دهد (شکل ۸-ج). برخی از این فرکانس‌ها در شکل ۸ علامت‌گذاری شده است. این رفتار نشان می‌دهد که همزمان با انتقال گردابه‌ها در طول شعله، اندرکنش میان مدهای غالب نیز افزایش می‌یابد. این فعل و انفعالات و پف کردن^۱ گازهای واکنشی دربرگیرنده بیشترین اندرکنش مدها هستند. شکل ۹ نشان‌دهنده طیف‌های مربوط به فشار، آزاد شدن حرارت و پرتو OH^* برای شعله پیش‌مخلوط ناقص است.

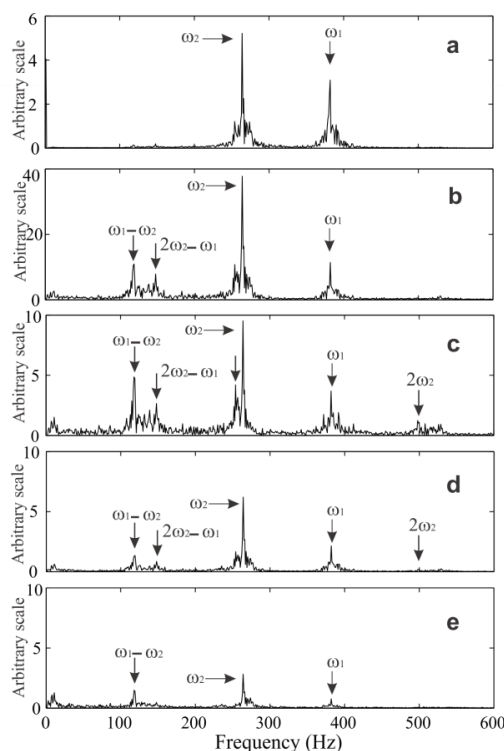


Figure 9- a) pressure spectrum b) overall heat release spectrum, integrated OH^* spectrum for c) top section d) middle section, e) base section of the flame image, $\phi=0.79$, imperfectly premixed

شکل ۹- a- طیف فشار، b- طیف گرمای آزاد شده کلی، طیف OH^* انتگرال‌گیری شده برای c- قسمت بالایی، d- بخش

میانی، e- پایه شعله. شعله پیش‌مخلوط جزئی با نسبت هم‌ارزی $\phi=0.79$.

رفتار کلی طیف‌ها در این حالت بسیار مشابه رفتار آن‌ها در شکل ۸ است. ترکیبی از تصاویر مربوط به مقدار و فاز، که در بخش قبل گفته شد، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. شکل ۱۰ برای فرکانس‌های بیشینه شکل ۷-ا (۳۷۹ هرتز) بدست آمده است. تصویر مربوط به بالاترین فرکانس، ۳۷۹ هرتز، در شکل ۱۰-ا نشان داده شده است. مانند آنچه که در شکل مشخص است، فازهای مختلف از یکدیگر به صورت کاملاً سازمان‌یافته توسط نوارهای رنگی جدا شده‌اند. تقریباً هیچ ترکیبی از این نواحی وجود ندارد. این عدم ترکیب بر این نکته که رفتار فازها از سرعت همرفتی^۲ جریان تأثیر می‌گیرد، تأکید دارد.

در شکل ۱۰-ب همین الگوی کیفی با تغییراتی اندک در فاز مشاهده شده است. با توجه به این که شکل ۱۰-ب مربوط به فرکانس پایین‌تر ۲۶۲ هرتز است، طول موج در این تصویر در مقایسه با شکل ۱۰-ا، بلندتر است. نواحی تیره اطراف پایه شعله،

¹Puffing

²Convection

نشان‌دهنده ناحیه‌هایی بدون هیچ نورتایی شیمیایی^۱ در هر دو طرف جسم مانع است. این منحنی‌های تاریک که در شکل ۴-۱۰-c نیز مشاهده شد، به احتمال زیاد ناشی از لایه‌های برشی ایجاد شده به وسیله جسم مانع است. مهم‌ترین اندرکنش مدها در شکل ۱۰-c برای فرکانس ۱۱۶ هرتز مورد تحلیل قرار گرفته است.

در مقایسه با شکل ۱۰-a و ۱۰-b، مشاهده می‌شود که در شکل ۱۰-c، نوارهای رنگی از یکدیگر جدا شده‌اند. در قسمت c، چین و چروک‌های^۲ زیاد همراه با ترکیب نواحی با رنگ‌های متفاوت (فازهای مختلف) بر روی نوارها مشاهده می‌شود. انتظار می‌رود که با کمتر بودن فرکانس در شکل ۱۰-c (کمتر از نصف فرکانس در شکل ۱۰-b)، تغییرات فازی کمتری (تغییرات رنگ کمتر) در این شکل به وجود آید. با این حال، شکل ۱۰-c این را نشان نمی‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷-a نشان داده شده مدهای مطالعه شده در قسمت‌های c و b شکل ۱۰ تقریباً دارای یک مرتبه بزرگی هستند. بنابراین به نظر می‌رسد که تفاوت‌های مشاهده شده بین این تصاویر، بیشتر دارای مبنای فیزیکی هستند، نه خطای پردازش تصویر. مطالعه دقیق‌تر شکل ۷-b این موضوع را که، تأثیر آکوستیک در فرکانس ۱۱۶ هرتز در مقایسه با سایر فرکانس‌ها ناچیز است، تأیید می‌کند. بنابراین انتظار می‌رود که این مد، یک مد هیدرودینامیکی باشد که با سرعت فاز متفاوتی انتشار می‌یابد و تحت تأثیر آشفتگی جریان قرار می‌گیرد. بررسی‌هایی برای روشن کردن این موضوع در حال انجام هستند.

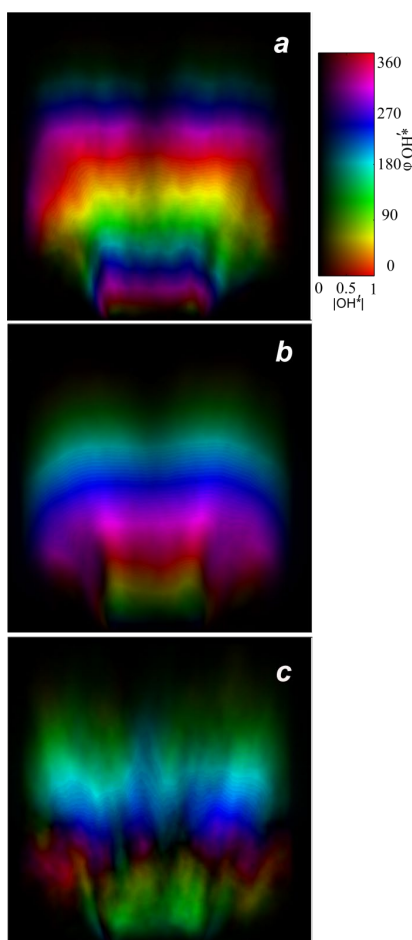


Figure 10- combined amplitude and phase images, $\phi=0.77$, a) 379 Hz, b) 262 Hz c) 116 Hz, colour map applies to all images

شکل ۱۰- تصاویر ترکیبی دامنه و فاز برای شعله پیش مخلوط، $\phi = 0.77$ ، ۳۷۹Hz-a، ۲۶۲ Hz-b و ۱۱۶Hz-c

^۱Chemiluminescence

^۲Wrinkling

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر محفظه احتراق در شرایط ناپایدار ترمو-آکوستیکی به طور تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نوسانات فشار درون محفظه احتراق اندازه‌گیری شد و همزمان با آن از شعله به کمک دوربینی با سرعت بالا عکس‌برداری شد. دامنه محدود (limit cycle) تک فرکانس در نسبت‌های هم‌ارزی کم و یا برای طول کوچک مجرای پایین‌دست مشاهده شد. اگرچه با افزایش اندکی در نسبت هم‌ارزی یا افزایش طول مجرای پایین‌دست، قله دوم در طیف فشار دیده شد. قله دوم ایجاد شده که در مقایسه با قله اول در فرکانس کوچک‌تری اتفاق می‌افتد، سریع رشد می‌کند و در نهایت بر نوسانات حاکم می‌شود. این حالت در بیشتر موارد آزمایش شده با بازگشت شعله به سمت بالادست جریان همراه است. بررسی طیف‌های OH^* حاکی از آن است که در ناحیه نزدیک به پایه شعله و اطراف جسم مانع، این طیف تنها دارای دو قله با ارتفاع کم است. با گسترده‌گی شعله به سمت پایین دست، تعداد و ارتفاع این قله‌ها و همچنین قله‌هایی که به علت اندرکنش بین این مدهای اصلی تولید می‌شوند، افزایش می‌یابد. این نوع رفتار در هر دو حالت پیش‌مخلوط کامل و ناقص مشاهده شد. روند بالا نشان‌دهنده یک رفتار غیرخطی است.

یک نمونه، بسیار ناپایدار و ناپایا برای مطالعه انتخاب شد و تکنیک پردازش تصویر فاز و دامنه برای سه مد غالب روی آن اعمال شد. برای مدهای غالب موجود در طیف فشار، الگوی واضحی از انتشار همرفتی فاز^۱ وجود دارد. اگرچه برای مد حاصل از اندرکنش این دو مد، تصویر دامنه و فاز بسیار پیچیده‌تر بود. در این حالت نواحی با فازهای مختلف با یکدیگر ترکیب می‌شوند. اگرچه بزرگی قله مربوط به این مد در طیف حرارت (فرکانس ۱۱۶ هرتز) به قله مشابه در فرکانس ۲۶۰ هرتز شبیه است، اما این مد دارای عامل آکوستیکی است. بنابراین انتظار می‌رود که این مد ناشی از فعل و انفعالات هیدرودینامیکی باشد. بررسی برای بیشتر مشخص شدن این دینامیک‌ها ادامه می‌یابد.

منابع

- [1] S. Candel, Proc. Combust. Inst., 29, pp. 1–28, Apr 2002.
- [2] T. Lieuwen and V. Yang, “Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling”, *Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA*, Reston, VA, June 2005.
- [3] Y. Huang and V. Yang, “Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion” *Prog. Energy Combust. Science*, 35, pp. 293–364, August 2009.
- [4] T. Lieuwen, “Modeling Premixed Combustion: Acoustic Wave Interactions: A Review”, *J. Propuls. Power*, 19, pp. 765–781, September 2003.
- [5] A.P. Dowling, “A kinematic model of a ducted flame”, *J. Fluid Mech.*, 394, pp. 51–72, September 1999.
- [6] M. Fleifil, A.M. Annaswamy, Z.A. Ghoneim and A.F. Ghoniem, “Response of a laminar premixed flame to flow oscillations: A kinematic model and thermoacoustic instability result”, *J. Combust. Flame*, 106, pp. 487–510, September 1996.
- [7] T. Schuller, D. Durox and S. Candel, “A unified model for the prediction of laminar flame transfer functions: comparisons between conical and V-flame dynamics”, *Combust. Flame*, 134, pp. 21–34, July 2003.
- [8] A. P. Dowling and S. R. Stow, “Acoustic Analysis of Gas Turbine Combustors”, *J. Propuls. Power*, 19, pp. 751-764, May 2012.
- [9] A.P. Dowling, “Nonlinear self-excited oscillations of a ducted flame”, *J. Fluid Mech.*, 346, pp. 271–290, September 1997.
- [10] N. Noiray, D. Durox, T. Schuller and S. Candel, “A unified framework for nonlinear combustion instability analysis based on the flame describing function”, *J. Fluid Mech.*, 615, pp. 139–167, November 2008.
- [11] D. Durox, T. Schuller, N. Noiray and S. Candel, “Flame Dynamics and Combustion Noise: Progress and Challenges”, *Proc. Combust. Inst.*, 32, pp. 391–1398, January 2009.
- [12] Wolfgang Polifke, “Modeling and Analysis of Premixed Flame Dynamics by Means of Distributed Time Delays”, *Progress in Energy and Combustion Science*, March 2020
- [13] K. Ogata, *Modern Control Engineering*. Prentice-Hall, 1970.
- [14] G. F. Franklin, J. D. Powell and A. Emami-Naeini, “Feedback Control of Dynamic Systems”, 5th edition, Upper Saddle River, NJ : Pearson Prentice Hall, 2006.
- [15] K. Balasubramanian and R. I. Sujith, “Non-normality in combustion–acoustic interaction in diffusion flames: a critical revision”, *J. Fluid Mech.*, 594, pp. 29–57, March 2008.
- [16] S Mariappan, R. I. Sujith, “Modelling nonlinear thermoacoustic instability in an electrically heated Rijke tube”, *J. Fluid Mech.*, 680, pp. 511–533, May 2011.

¹Convection phase propagation

- [17] K. Balasubramanian, R. I. Sujith, "Thermoacoustic Instability in a Rijke Tube: Non-Normality and Nonlinearity", *Phys. Fluid.*, 20 (4), pp. 44103-11, April 2008.
- [18] K. Kashinath, S. Hemchandra and M. Juniper, Proceedings of ASME Turbo Expo., GT2012-68726, May 2012.
- [19] K. Kashinath, M. Juniper and S. Hemchandra, Proceedings of the 19th International Congress on Sound and Vibration, Jan 2012.
- [20] O. P. Graham, Modelling of the thermoacoustic response of premixed flames, PhD thesis, University of Cambridge, May 2012.
- [21] S. d'Ambrosio, A. Ferrari, Z. Jin, "Time-frequency analysis application to the evaluation of instantaneous combustion noise," *Fuel.*, vol. 122655, pp. 312, May 2022.
- [22] M. Huet, L. Geiger, "Modeling of indirect combustion noise through a stator," *Journal of Sound and Vibration.*, vol. 540, pp. 117296, April 2022.
- [23] A. L. Pillai, S. Inoue, T. Shoji, S. Tachibana, T. Yokomori and R. Kurose, "Investigation of combustion noise generated by an open lean-premixed H₂/air low-swirl flame using the hybrid LES/APE-RF framework," *Combustion and Flame.*, vol. 245, pp. 112360, May 2022.
- [24] M. A. Akhtardanesh, M. J. Hosseinkhani, and M. Farshchi, "The Effect of Hydrogen Addition on the Acoustic Response of a Partially Premixed Counterflow Flame", *Fuel and Combustion*, 16(4), p.p. 43-60, June 2024.
- [25] A. Hasanabadi, S. Vakilipour and R. Rahmati, "Study of hydrogen-methane flame structure in Sydney swirl stabilized burner using volumetric combustion model", *Fuel and Combustion*, 17(2), p.p. 37-56, August 2024.
- [26] N. Hajjaligol, "Analysis of combustion noise by changing inlet velocity in lean turbulent premixed flame", *Fuel and Combustion*, 15(4), pp 108-130, June 2023,
- [27] N. Hajjaligol and M. Jamali, "Numerical investigation of combustion noise in gas turbine combustor using hydrogen/ethylene: machine learning optimization", *Fuel and Combustion*, 16(3), pp 40-59, May 2024,
- [28] M. Hauser, M. Lorenz and T. Sattelmayer, "Influence of Transversal Acoustic Excitation of the Burner Approach Flow on the Flame Structure", *J. Eng. Gas Turbine Power*, 133, pp. 41501-8. May 2011.

English Abstract

Experimental analysis of thermo-acoustic instabilities and interaction of oscillatory modes in lean premixed flames using image processing technique

Najmeh Hajialigol*

Department of Mechanical Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

*Corresponding author

(Received: 2024/09/24, Received in revised form: 2024/11/08, Accepted: 2024/12/10)

This paper explores transient phenomena in a thermo-acoustically unstable, laboratory-scale combustor with a thermal power of nearly 10 kW. The study focuses on enclosed, turbulent premixed and imperfectly premixed methane flames, maintained at a constant cold flow velocity with varying overall equivalence ratios (0.7-0.87). The swirling flame is stabilized in the wake of a bluff-body, and thermo-acoustic oscillations are induced by extending the length of the downstream duct. Observations reveal that single frequency limit cycles occur at low equivalence ratios or with short downstream ducts, showing no significant changes over time. However, a slight increase in duct length or equivalence ratio introduces a second mode in the pressure spectrum. This mode, with a lower frequency than the first, grows over time and eventually dominates the oscillations, often leading to flame flashback into the upstream duct. Analysis of the OH images shows similar trends in the integrated OH signal, with significant peaks at various linear combinations of the two main frequencies observed in the pressure spectrum. These peaks are more pronounced in the OH signal spectrum than in the pressure spectrum. Investigation of the integrated OH over flame slices indicates that close to the flame holder, the spectrum includes only the two main peaks and their difference. However, the number of peaks increases as downstream slices of the flame are considered. The generation of these modes, observed in both premixed and imperfectly premixed cases, is associated with the puffing of reactive fluid downstream of the flame, indicating nonlinear behavior. A new image processing technique is proposed to further analyze the flame's response to this multi-frequency excitation.

Key words: Combustion chamber, Instability, Premixed, Thermo-acoustic.