



تشخیص ناپایداری شعله در مشعل پیش‌آمیخته شعله سطحی با استفاده از تحلیل فرکانسی

محمدهادی بدرخواهان^۱، محمد ضابطیان طرقي^{۲*} و محمدرضا كرفي^۳

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، M.badrkhahan@modares.ac.ir

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، Zabetian@modares.ac.ir

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، Karafi@modares.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۸/۰۶/۰۴، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۸/۱۰/۰۳، پذیرش: ۹۸/۱۰/۱۰)

چکیده: در این پژوهش، با استفاده از حسگر نوری و سیستم داده‌برداری، به بررسی پایداری مشعل شعله سطحی پرداخته می‌شود. نوسانات شدت نور توسط حسگر نوری اندازه‌گیری و سپس، با استفاده از تبدیل فوریه سریع، از فضای زمانی به فضای فرکانسی انتقال داده شد و از منحنی پاسخ فرکانسی، فرکانس طبیعی نوسانات استخراج شد. برای اینکه بتوانیم رفتار دینامیک را برای شعله پیش‌آمیخته نشان دهیم، شعله‌های پیش‌آمیخته به دو ناحیه شعله‌های سلولی و شعله‌های مسطح تقسیم‌بندی می‌شوند. این تقسیم‌بندی وابسته به نرخ جریان و نسبت هم‌ارزی است. در شعله‌های مسطح، با افزایش نرخ جریان، به دلیل افزایش سرعت گازهای داغ سوخته‌شده، فرکانس نوسانات نیز افزایش می‌یابد. در شعله‌های سلولی، با افزایش نرخ جریان، فرکانس نوسانات کاهش پیدا می‌کند. در نرخ‌های جریان یکسان، کاهش شدید فرکانس نوسانات نشان‌دهنده ظهور شعله‌های سلولی است. بنابراین، امکان تشخیص گذر شعله از حالت مسطح به سلولی فراهم می‌شود. زمانی که در یک نرخ جریان ثابت، با افزایش نسبت هم‌ارزی، شاهد افزایش فرکانس نوسانات نباشیم، انتقال از شعله سلولی به شعله مسطح اتفاق می‌افتد. شروع انتقال از شعله سلولی به شعله مسطح در نرخ‌های جریان ۱/۱، ۱/۲، ۱/۳، ۱/۴، ۱/۵ و ۱/۶ مترمکعب بر ساعت به ترتیب در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۱۶، ۰/۲۲، ۰/۲۶، ۰/۳۴، ۰/۴۶ و ۰/۶۷ اتفاق می‌افتد. محل شروع انتقال منطبق بر شروع ناحیه برخاستگی براساس پردازش تصویر است. این پژوهش، دارای جنبه‌های تازه‌ای از بررسی پایداری شعله می‌باشد بدون آنکه سبب اختلال در شکل شعله شود و به رژیم شعله آسیب وارد کند.

کلیدواژگان: ناپایداری ذاتی، شعله سلولی، شعله مسطح، فرکانس طبیعی نوسانات، تحلیل فرکانسی

مقدمه

یکی از ابزارهای اندازه‌گیری در احتراق بررسی نور تابیده‌شده از شعله است. نور تابیده‌شده از شعله می‌تواند بدون تحریک منبع انرژی خارجی یا توسط تحریک منبع انرژی خارجی مورد بررسی قرار گیرد که به آن‌ها روش‌های غیرتداخلی گفته می‌شود. برخی از روش‌ها در تشخیص‌های احتراقی به صورت تداخلی است به این معنا که حسگر اندازه‌گیری به صورت مستقیم در محل اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. این مسئله می‌تواند در شعله منجر به واکنش‌های ناخواسته و اختلال در شکل شعله شود. همچنین، ممکن است که دسترسی به شعله امکان‌پذیر نباشد. در این مواقع، روش‌های غیرتداخلی مطرح می‌شود که تحلیل سری زمانی از جمله این روش‌هاست [۱]. اندازه‌گیری‌های تداخلی شامل روش فعال و غیرفعال است. روش‌های فعال روش‌هایی هستند که در آن لیزر به کار می‌رود و معمولاً بستر آزمون این گونه از روش‌ها گران‌قیمت است [۱]. روش‌های غیرفعال روش‌هایی هستند که در آن‌ها لیزر به کار نمی‌رود. بررسی سنجش تابش شعله به کمک فیبرنوری، حسگر نوری^۱ و دوربین از جمله این روش‌هاست که به طور کلی به آن‌ها طیف‌سنجی تابشی شعله یا FES گفته می‌شود.

1. Photodiode

2. Flame Emission Spectroscopy

تشخيص ناپايداري شعله در شعله‌هاي پيش‌آميخته از روي تحليل سري زماني و با استفاده از تحليل فرکانسي توسط حسگر نوري انجام مي‌شود. به اين صورت که با تحليل مجموعه‌اي از فرکانس طبيعي نوسانات (فرکانس پیک) می‌توان نسبت‌هاي هم‌ارزي که شعله در آن ناپايدار است را تشخيص داد. ناپايداري شعله‌هاي پيش‌آميخته در آزمايش‌ها به‌صورت شعله‌هاي سلولي و رفتار ديناميكي پيشاني شعله مشاهده مي‌شود [۳،۲]. ناپايداري ذاتي شعله‌هاي پيش‌آميخته به‌صورت عمده شامل اثرات هيدروديناميكي ناشي از انبساط حرارتي ميان پيشاني شعله و اثرات اغتشاشي-دمائي ناشي از پيشي‌گرفتن نفوذ جرم در مقابل نفوذ حرارت (عدد لوييس کمتر از يك) است [۴]. تحقيقات و آزمايش‌ها نشان مي‌دهد که شکل و رفتار پيشاني شعله به‌شدت وابسته به ناپايداري ذاتي است [۵-۸]. ناپايداري ذاتي اثر زيادي روي رفتار ديناميكي شعله‌هاي پيش‌آميخته دارد و اين رفتار ديناميكي به‌صورت زيادي وابسته به نوسانات شدت نور است [۹].

با تحليل سري زماني و متعاقب آن تحليل فرکانسي، می‌توانیم سطوح ناپايداري را تخمين بزنيم. می‌توان با استفاده از روش‌هاي عددي، روش‌هاي آزمايشگاهی يا روش تحليل سري زماني، ناپايداري شعله را تشخيص داد. درواقع، تحليل سري زماني ناپايداري شعله را از زاويه ديگري بررسي مي‌کند.

گوتودا و همکاران، در سال ۲۰۰۲ [۱۰] و ۲۰۰۵ [۱۱]، جابه‌جايي پيشاني شعله مشعل بانسن^۱ را از ديده‌گاه ديناميك غيرخطي مورد بررسي قرار دادند. وي سري زماني جابه‌جايي پيشاني شعله را رسم کرد. سپس، با انجام تبديل فوريه سريع (FFT) مقدار فرکانس‌هاي اصلي تغييرات مكاني پيشاني شعله را به‌دست آورد. گوتودا، علاوه بر به‌دست آوردن فرکانس اصلي، براي تحليل شعله، به‌عنوان يك پديده ديناميكي غيرخطي، از جاذب بازسازي شده استفاده کرده است. اين جاذب براساس تئوري تيکن [۱۲]، که در سال ۱۹۸۱ به‌دست آمده است، توليد مي‌شود.

کاوپرداد و همکاران [۱۳]، در سال ۲۰۰۷، اثرات افت گرما روي رفتار اغتشاشي شعله پيش‌آميخته سلولي را به‌صورت عددي، مورد مطالعه قرار دادند. ايشان دريافتند که اثرات افت گرما روي شعله پيش‌آميخته سلولي ناشي از ناپايداري ذاتي اين شعله‌هاست. اين ناپايداري ذاتي ناشي از عدد لوييس کمتر از يك است؛ يعني نفوذ جرم از نفوذ حرارت پيشي مي‌گيرد و باعث افت حرارت مي‌شود. وي تحليل سري زماني را روي نوسانات سرعت شعله آرام اجرا کرد و مشاهده کرد که در نمودار دامنه برحسب فرکانس، يك فرکانس پيك وجود دارد. اين فرکانس پيك همان فرکانس طبيعي نوسانات سرعت شعله است. سپس، جاذب بازسازي شده را براي سري زماني يادشده به‌دست آورد. درنهايت، با تحليل اين جاذب و به‌دست آوردن همبستگي ابعادي، توانست تأثير افت گرما روي ناپايداري ذاتي شعله‌هاي پيش‌آميخته سلولي را تحليل کند.

کادوواکي و همکاران [۱۴]، در سال ۲۰۰۸، کار کاوپرداد و گوتودا را ادامه داده و اين بار سري زماني شدت نور دريافتي از شعله پيش‌آميخته رقيق را مورد بررسي قرار دادند. نور دريافتي از شعله همان نور ساطع شده از راديکال‌هاي شعله است. بنا بر اين، تأثير زيادي روي ديناميك شعله و در ادامه، روي ناپايداري ذاتي شعله‌هاي پيش‌آميخته رقيق دارد. وي، با بررسي شدت نور دريافتي از شعله نسبت به زمان، توانست روشي را ابداع کند که ناپايداري شعله توسط آن قابل تخمين باشد. کادوواکي نشان داد که هرچه نسبت هم‌ارزي از يك کمتر مي‌شود، شعله پيش‌آميخته به سمت سلولي شدن و ناپايداري پيش مي‌رود. نوسانات شدت نور دريافتي نسبت به زمان در نسبت هم‌ارزي ۰/۶۶ شديدتر از نسبت هم‌ارزي ۱ است. وي دليل اين موضوع را ناپايداري ذاتي شعله رقيق و اثرات افت گرما، ناشي از پيشي‌گرفتن نفوذ جرم نسبت به نفوذ حرارت، دانست. به همين دليل است که در نسبت هم‌ارزي ۰/۶۶ و نرخ جريان ۴۰ ليتر بر دقيقه نوسانات بسيار شديدتري مشاهده مي‌شود. زيرا، افزايش نرخ جريان باعث افزايش تأثير ناپايداري ناشي از عدد لوييس کمتر از يك مي‌شود. وي، با انجام FFT بر روي سري زماني يادشده، نشان داد که در نسبت‌هاي هم‌ارزي پايين، فرکانس پيك نيز کمتر است. اين فرکانس پيك همان فرکانس عمومي شعله‌هاي پيش‌آميخته است که عمدتاً ناشي از جريان برشي بين گازهاي داغ سوخته شده و گازهاي اتمسفر است.

1. Bunsen burner
2. Fast Fourier Transform

لی و همکاران، در سال ۲۰۱۱ [۱۵]، به بررسی پایداری شعله در مشعل شعله‌سطحی استوانه‌ای پرداختند. در این پژوهش، چهار مشعل شعله‌سطحی استوانه‌ای با ساختار سوراخ‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و از میان این مشعل‌ها آرایش بهینه از نظر محدوده پایداری شعله انتخاب شد. در این پژوهش، محدوده پایداری براساس نمودار نسبت هم‌ارزی برحسب نرخ جریان ورودی بین دو حالت بازگشت شعله در دی‌های کم و خاموشی شعله در دی‌های بالا تعریف می‌شد.

تحقیقات کادوواکی [۱۴]، کاوپراداپ، گوتودا و دیگران [۱۳-۱۰] یک روش جدید برای تحلیل مشخصه‌های احتراقی شعله‌های پیش‌آمیخته محسوب می‌شود. بررسی رفتار دینامیکی شعله، اعم از جابه‌جایی پیشانی شعله [۱۸-۱۶]، نوسانات شدت نور دریافتی [۲۱-۱۹]، سرعت سوزش [۲۲] و غیره در واحد زمان، اطلاعات خوبی در مورد پایداری و ناپایداری شعله ارائه می‌دهد.

مشعل پیش‌آمیخته شعله سطحی در موارد صنعتی مانند دیگ‌های چگالشی کاربرد دارد. این پژوهش، دارای جنبه‌های تازه‌ای از بررسی پایداری شعله می‌باشد بدون آنکه سبب اختلال در شکل شعله شود و به رژیم شعله آسیب وارد کند. در کاربردهای صنعتی از آشکارسازهای نوری، صرفاً برای شرایط راه‌اندازی مشعل‌ها، استفاده می‌شود، اما می‌توان از آشکارسازهای نوری برای شرایط تنظیم مشعل‌ها نیز استفاده کرد. در واقع، نقشه تنظیم مشعل را با این آشکارسازهای نوری ارائه کرد، به این ترتیب که به‌صورت پویا یا دینامیک، شرایط کارکرد تنظیم مشعل ارائه می‌شود. برای مثال، در نمونه‌های صنعتی، از دودکش بازخورد می‌گیرند و شرایط تنظیم را کنترل‌کننده پیاده می‌کند، اما در کار حاضر، می‌توان با روشی ساده شرایط تنظیم را ارائه کرد. روش تحلیل فرکانسی با استفاده از آشکارسازهای نوری روشی است که امکان تعمیم به سرمشعل‌های مختلف با رژیم‌های احتراقی مختلف را داراست و می‌توان مشخصه‌های احتراقی را از آن استخراج کرد. پایداری یکی از این مشخصه‌هاست که در این پژوهش به بررسی پایداری شعله با استفاده از روش تحلیل فرکانسی در یک نوع مشعل خاص (شعله سطحی) پرداخته می‌شود. از تحلیل فرکانسی برای تشخیص شعله‌های سلولی و مسطح به‌صورت محدود استفاده شده است.

تئوری و استخراج محدوده پایداری مشعل حرارتی

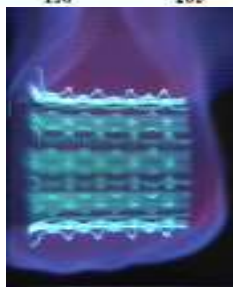
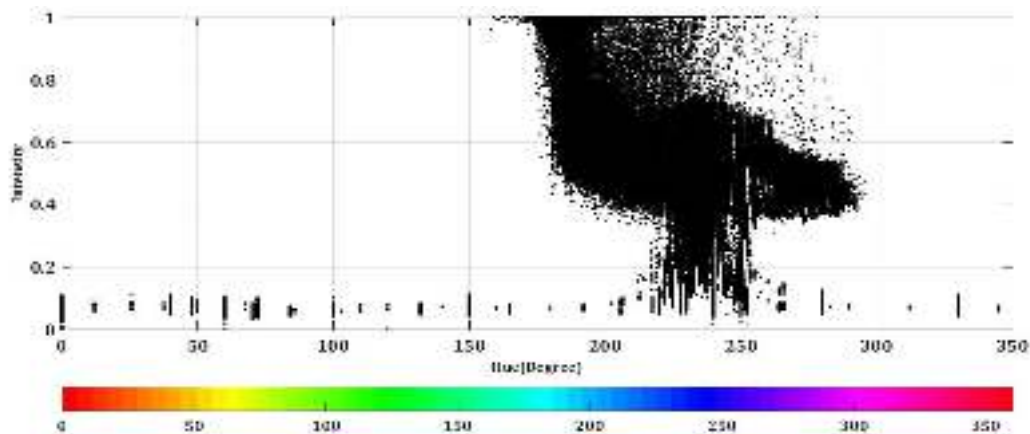
یکی از اصولی که در طراحی مشعل‌های گازی باید مورد توجه قرار گیرد جلوگیری از بازگشت و برخاستگی شعله است. اگر سرعت شعله آرام بر سرعت جریان مخلوط ورودی غلبه کند، بازگشت شعله اتفاق می‌افتد. همچنین، اگر سرعت جریان مخلوط ورودی بر سرعت شعله آرام غلبه کند، برخاستگی شعله ایجاد می‌شود [۲۳].

به بیانی دیگر، بازگشت شعله هنگامی اتفاق می‌افتد که شعله بدون خاموشی به داخل مشعل کشیده شود و داخل مشعل پخش شود. بازگشت شعله از آن جهت حائز اهمیت است که کشیده شدن شعله به داخل مشعل می‌تواند سبب ایجاد جرقه برای حجم گاز داخل محفظه اختلاط و ایجاد انفجار شود. برخاستگی شعله نیز در شرایطی اتفاق می‌افتد که شعله به سطح سرمشعل نچسبیده باشد، اما در فاصله‌ای از سطح سوراخ سرمشعل پایدار باشد. برخاستگی شعله باعث رها شدن گازهای نسوخته و در نتیجه ایجاد احتراق ناقص می‌شود. شعله‌ای که با فاصله از سوراخ سرمشعل ایجاد می‌شود سبب انتقال حرارت ضعیف و بروز سروصدا می‌شود. همچنین، برخاستگی شعله باعث نفوذ هوای ثانویه به داخل شعله می‌شود [۲۳].

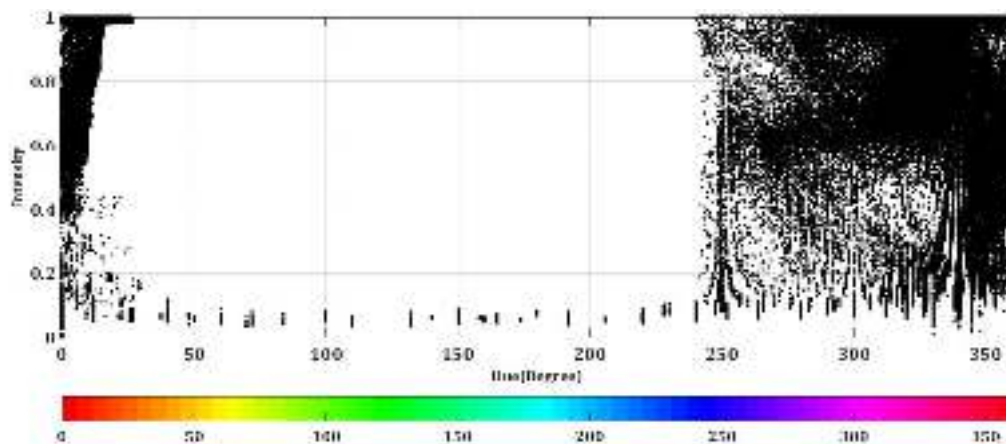
در پژوهشی، نجارنیکو، در سال ۲۰۱۸ [۲۴]، محدوده نسبت‌های هم‌ارزی پایدار را با استفاده از پردازش تصویر به کمک فضای رنگی HSI به دست آورده است. فضای رنگی HSI مقدار شدت روشنایی را با دو مفهوم جزء رنگ و مقدار اشباع بیان می‌کند. جزء رنگ مقدار طیف رنگی را بین ۰/۱ یا ۰/۳۶۰ شامل می‌شود که مقدار ۰ به رنگ قرمز و مقدار ۱ یا ۳۶۰ به رنگ بنفش اشاره دارد. جزء اشباع مقدار رقیق‌شدگی رنگ را با نور سفید نمایش می‌دهد. هرچه از محور سفید و مشکی فاصله بگیریم، مقدار اشباع رنگ بیشتر می‌شود. روی محیط دایره، مقدار اشباع ۱ و روی محور مرکزی ۰ است. هرچه مقطع دایره به رنگ سفید نزدیک‌تر باشد، مقدار جزء شدت بیشتر می‌شود. شدت رنگ آبی ۰ و شدت رنگ سفید ۱ است [۲۵].

1. Feedback
2. Hue-Saturation-Intensity

با استفاده از فضای رنگی HSI، مناطق مختلف احتراقی، از نظر توان مشعل و نسبت هم‌ارزی، در پنج حالت شعله سبز، زرد تشعشعی، آبی پایدار، مرز برخاستگی و خاموشی دسته‌بندی شده است. در شکل ۱، از فضای رنگی HSI به‌همراه تصاویر شعله برای چهار نسبت هم‌ارزی، در ظرفیت ثابت ۱۲/۷۷ kW، استفاده شده است.



Phi=1.1
(a)



Phi=0.92
(b)

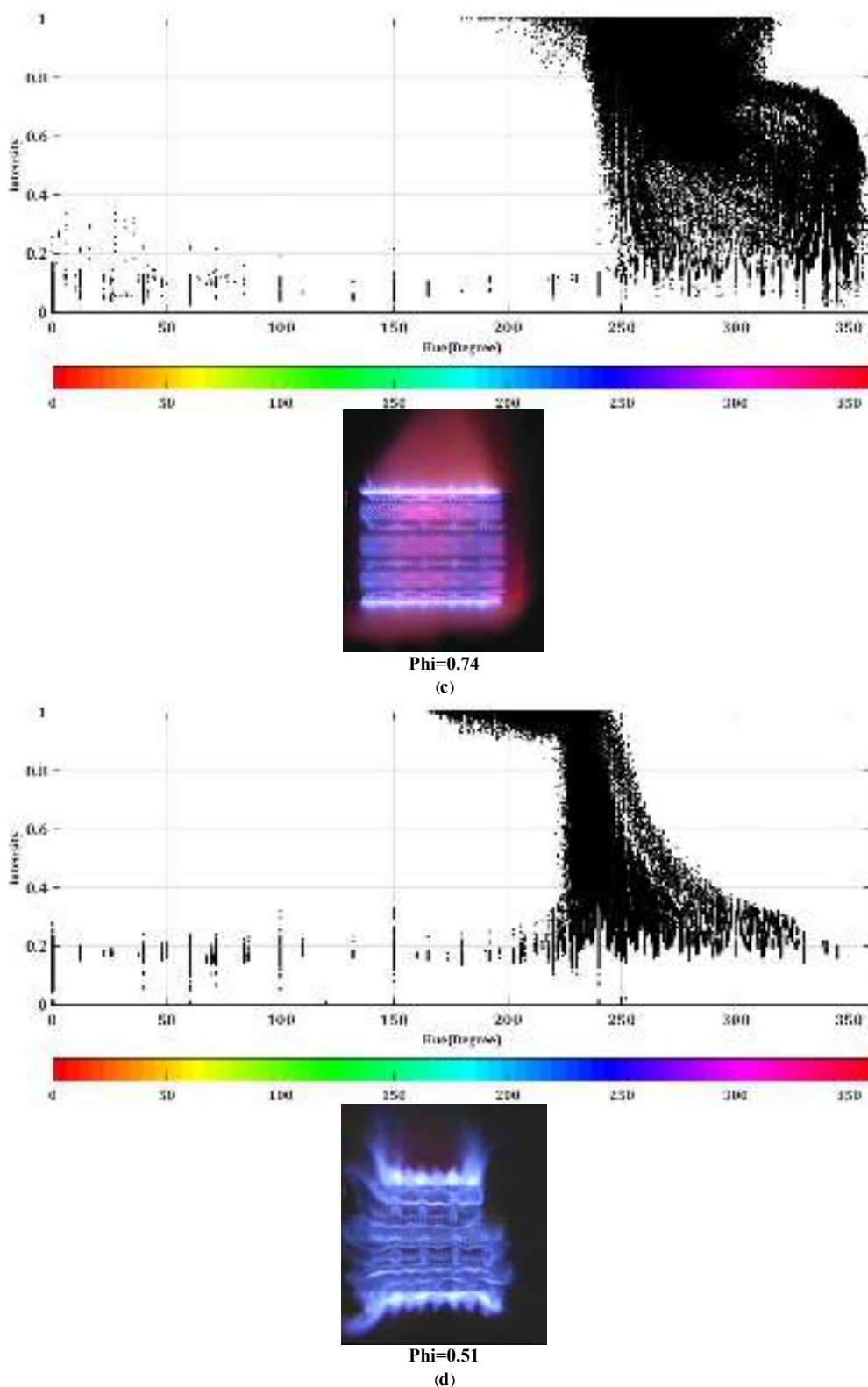


Figure 1- Color intensity spectra in the burner power of 12.77 kW
 a) Green flame b) yellow radiant flame c) persistent blue flame d) flame rise and extinction
 شکل ۱- نمودار شدت بر حسب طیف رنگی در ظرفیت حرارتی ۱۲/۷۷ کیلووات [۲۴]
 (a) شعله سبز، (b) شعله زرد تشعشعی، (c) شعله آبی پایدار و (d) برخاستگی و خاموشی شعله

درواقع، این نمودار کمک می‌کند که به‌طور حدودی پراکندگی طیف رنگی دریافتی از شعله به‌دست بیاید. به‌عنوان مثال، در شکل ۱-۱-۱، شعله آبی پایدار آورده شده است. واضح است که طیف رنگی دریافتی از مشعل بیشتر در محدوده آبی (۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه طیفی) و فرورسرخ (۳۰۰ تا ۳۶۰ درجه طیفی) است. یعنی حتی قسمت‌هایی از مشعل که به رنگ قرمز مشاهده می‌شود نیز در واقع جزء محدوده فرورسرخ است، به‌طوری که طیف‌های رنگی سبز و قرمز تقریباً قابل صرف‌نظر کردن است. در این حالت، میانگین جزء H، ۲۷۶ درجه است، درحالی که در شکل ۱-۱-۱، این مقدار ۲۰۰ درجه است. این موضوع به‌دلیل وجود رنگ فیروزه‌ای در نسبت هم‌ارزی ۱/۱ است. در واقع، از غلظت طیف فرورسرخ و آبی کم شده و در عوض به طیف رنگی فیروزه‌ای (۱۸۰ درجه) اضافه شده است [۲۴]. وجود رنگ فیروزه‌ای در شعله بیانگر تولید رادیکال C_2 است [۲۶].

در شکل ۱-۱-۲، یک شعله زرد تشعشی مشاهده می‌شود که نمودار شدت برحسب طیف آن شکل ویژه‌ای پیدا کرده است. در این نمودار، تا حدود زیادی فقط طیف قرمز و فرورسرخ مشاهده می‌شود. این موضوع اعتبار ویژه‌ای به نام‌گذاری شعله زرد تشعشی می‌دهد. در شکل ۱-۱-۳، در مقایسه با شکل ۱ (c)، از غلظت طیف فرورسرخ کم و به غلظت طیف آبی و کمی هم فیروزه‌ای اضافه شده است. کاملاً واضح است که شعله در نسبت هم‌ارزی ۰/۵۱ تشعشع فرورسرخ پایینی دارد و این موضوع توسط نمودار هم به‌خوبی نمایش داده شده است [۲۴]. نتایج حاصل از شکل ۱ بر روی بستر آزمون مشعل شعله سطحی انجام شده است که این بستر آزمون در بخش طراحی آزمایش شرح داده می‌شود.

شکل ۲ دیاگرام پایداری مشعل شعله سطحی استوانه‌ای براساس آزمایش‌های تجربی مبتنی بر استفاده از پردازش تصویر را نشان می‌دهد. مناطق مختلف احتراقی، از نظر توان مشعل و نسبت هم‌ارزی، در پنج حالت شعله سبز، زرد تشعشی، آبی پایدار، مرز برخاستگی و خاموشی دسته‌بندی شده است. ذکر این نکته لازم است که برخاستگی شعله از روی سر مشعل به‌صورت یکجا نبوده، بلکه از شعله‌های کوچک نزدیک لبه‌ها شروع شده و با ازدیاد بیشتر هوا، به سمت مرکز سر مشعل می‌رود. در نتیجه، حد برخاستگی همان ابتدای برخاستگی شعله، که از طرفین است، در نظر گرفته شده است [۲۴]. نتایج حاصل از شکل ۲ بر روی بستر آزمون مشعل شعله سطحی، توسط نجارنیکو [۲۴]، آورده شده است که از این بستر آزمون در کار حاضر نیز استفاده شده است. افزایش دامنه پایداری با کاهش ناحیه بروز شعله زرد تشعشی و افزایش حد برخاستگی شعله با افزایش ظرفیت حرارتی، همراه است.

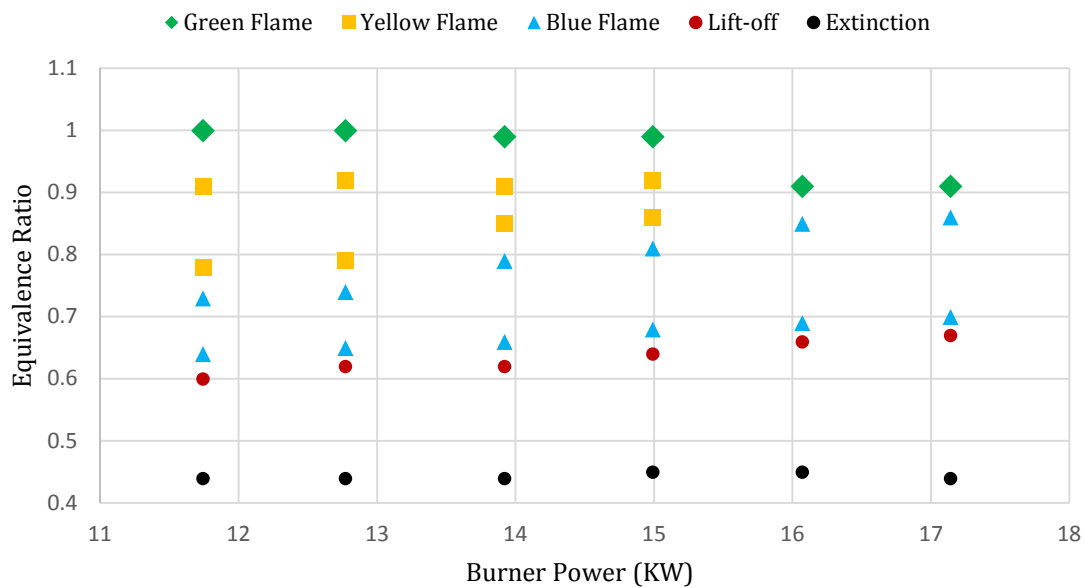


Figure 2- Cylindrical surface flame burner stability diagram [12]

شکل ۲- دیاگرام پایداری مشعل شعله سطحی استوانه‌ای [۲۴]

طراحی آزمایش

یک مشعل شعله سطحی، که به طور گسترده‌ای در صنایع احتراق (دیگ‌های چگالشی) به کار برده می‌شود، در این مطالعه استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، گاز طبیعی از یک خط گاز (۱) با فشار نسبی ۹/۶۵ کیلوپاسکال به مخلوط‌کننده (۴)، از طریق یک تنظیم‌کننده (۲)، که فشار را تنظیم می‌کند، وارد می‌شود. سرعت جریان سوخت قبل از ورود به مخلوط‌کننده توسط یک روتامتر (۳) اندازه‌گیری می‌شود. جریان هوا توسط دمنده (۵)، به مخلوط‌کننده با تنظیم‌کننده در مسیر خود و یک روتامتر برای اندازه‌گیری جریان آن، دمیده می‌شود. دو دماسنج و دو فشارسنج در هر مسیر برای کنترل این پارامترها قبل از مخلوط استفاده می‌شود. پس از اختلاط، جریان چندجزئی به سمت مشعل شعله سطحی هدایت می‌شود و دمای آن با یک دماسنج اندازه‌گیری می‌شود. توسط دماسنج می‌توان امکان بررسی پارامتریک اثر پیش‌گرمایش و امکان تغییر شرایط دمای ورودی بر پارامترهای عملکردی مشعل را مورد ارزیابی و مطالعه قرار داد که البته در کار حاضر از آن استفاده نشده است، ولی این تجهیز در مجموعه بستر آزمون موجود است. اختلاط سوخت و هوا قبل از ورود به سر مشعل انجام شده و توسط وسیله‌ای به نام مخلوط‌کننده انجام می‌شود. ظرفیت نامی مشعل ۳۰ KW است. در جدول ۱، تجهیزات اندازه‌گیری به همراه محدوده‌های آن‌ها به صورت مختصر آورده شده است.

جریان حسگر نوری BPX 65 توسط مقاومت تبدیل به ولتاژ شده، سپس، این ولتاژ، توسط آمپلی فایر، ۱۰۰۰۰ برابر تقویت شده و در آخر به سیستم داده‌برداری ADV/USB-4704-AE متصل می‌شود و براساس نرخ ۱۴ بیتی سیستم داده‌برداری، سیگنال سری زمانی نوسانات شدت نور دریافتی به صورت دیجیتالی و با رزولوشن مشخص ذخیره می‌شود. سپس، با استفاده از تبدیل فوری سریع، نوسانات شدت نور برحسب فرکانس ذخیره می‌شود. برد حسگر نوری در فاصله ۴۰ سانتی‌متری از سطح سر مشعل قرار می‌گیرد. نرخ داده‌برداری زمانی و نرخ داده‌برداری فرکانسی به ترتیب ۱۰ ثانیه و ۱۰ کیلوهرتز است. آزمایش‌ها در دمای محیط ۲۷ درجه سلسیوس، فشار محیطی ۸۸/۵ کیلوپاسکال، محدوده دبی معادل ۱/۶-۱/۱ متر مکعب بر ساعت و ظرفیت محدوده مشعل ۱۰-۲۰ کیلووات انجام می‌شود. تجزیه و تحلیل عدم قطعیت داده‌های تجربی انجام شده و سطح قابل قبول زیر انحراف استاندارد نسبی ۱۰٪ داده‌ها محاسبه شده است.

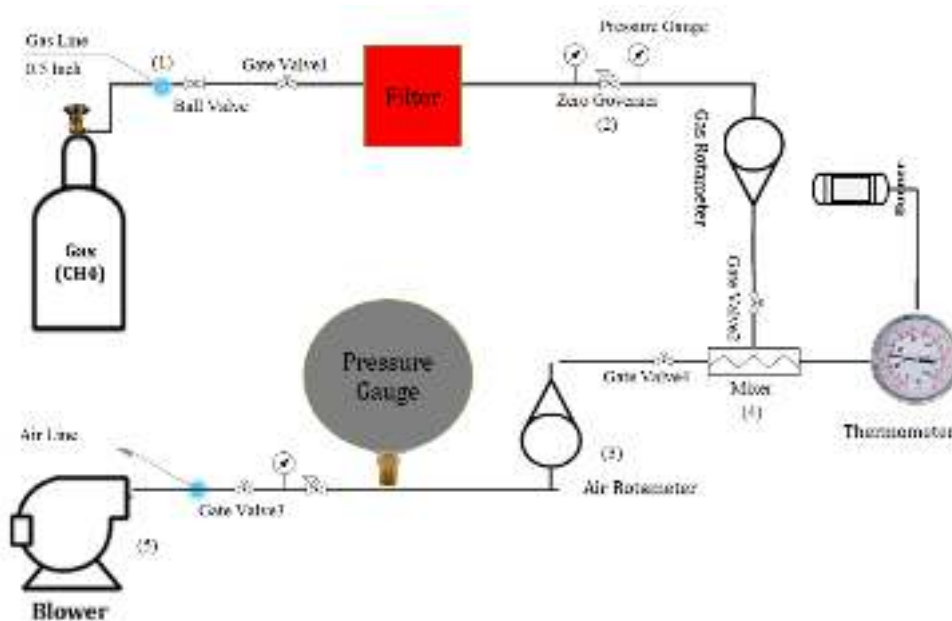


Figure 3- Air and fuel pipeline map with control and metering equipment

شکل ۳- نقشه لوله‌کشی مسیر هوا و سوخت به همراه تجهیزات کنترلی و اندازه‌گیری

جدول ۱- محدوده و دقت تجهيزات اندازه‌گيري

Table 1- Scope and accuracy of measuring equipment

Equipment	Range	Precision
Air travel thermometer	0-60 °C	±1 °C
Gas path thermometer	0-60 °C	±1 °C
Air Rotameter	0.5-45 m ³ /h	±1 m ³ /h
Gas Rotameter	0.3-3 m ³ /h	±0.05 m ³ /h
Relative pressure sensor for gas and air paths	0-100 mbar	±1mbar

در شکل ۴ طرحواره‌ای از بستر آزمون و تجهيزات اندازه‌گيري نشان داده شده است. برای جلوگیری از تداخل نوری، نور محیط حذف شده است. از شرایط مرزی آکوستیکی نیز، صرف‌نظر شده است، چراکه آزمایش‌ها در محفظه احتراق انجام شده است. حسگر نوری، برای ایجاد شناوری در نسبت‌های هم‌ارزی زیاد (غنی‌سوز) و ایجاد حجمی از شعله در اطراف سر مشعل، در فاصله مناسبی از سر مشعل قرار گرفته است، به‌طوری که حسگر نوری سطح سر مشعل را مورد بررسی قرار می‌دهد. نوسانات شدت نور دریافتی از شعله بیانگر تغییرات غلظت گونه‌های احتراقی است. برای بیان تغییرات غلظت یک گونه خاص باید از فیلتر تداخلی استفاده کرد. به‌طوری که با اندازه‌گیری شدت نور دریافتی در یک محدوده طول موجی به‌خصوص، که آن گونه نورتابی شیمیایی دارد، می‌توان تغییرات غلظت آن گونه را به‌دست آورد. شکل ۵ نوسانات شدت نور دریافتی از شعله برحسب زمان را در نسبت هم‌ارزی ۰/۶۴ و ظرفیت حرارتی ۱۷/۱۴ کیلووات، نشان می‌دهد که از نتایج کار حاضر است.

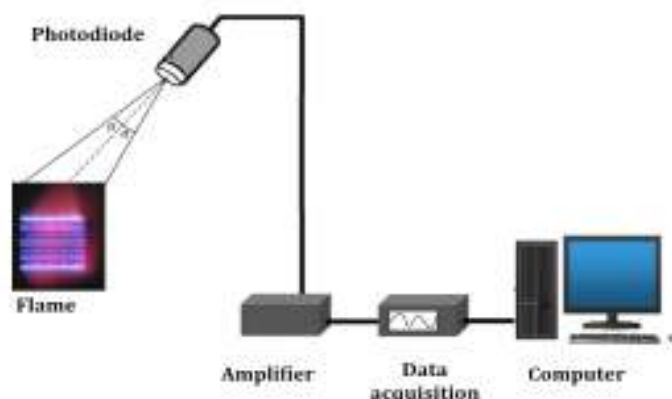


Figure 4- Schematic of the set up and measuring equipment

شکل ۴- طرحواره‌ای از بستر آزمون و تجهيزات اندازه‌گيري

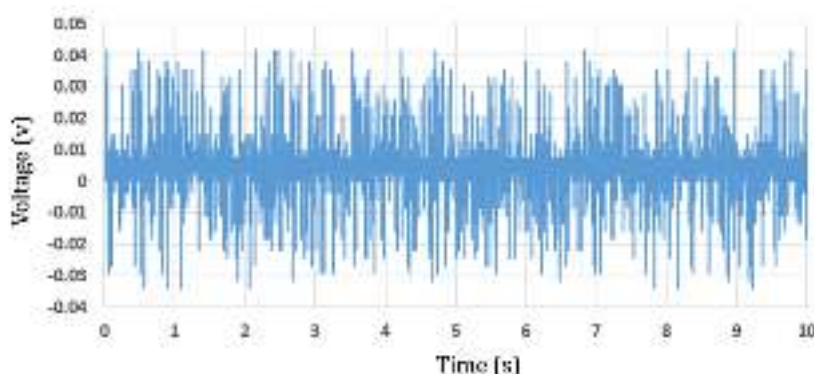


Figure 5- Changes in the light intensity of the flame over time at the equivalence ratio of 0.64 and burner power of 17.14 kW

شکل ۵- نوسانات شدت نور دریافتی از شعله برحسب زمان در نسبت هم‌ارزی ۰/۶۴ و ظرفیت حرارتی ۱۷/۱۴ کیلووات

نوسانات شدت نور دریافتی از شعله برحسب زمان، توسط کد تبدیل فوریه سریع در فضای نرم افزار متلب، تبدیل به منحنی تراکم توان طیفی یا همان منحنی پاسخ فرکانسی می شود. در منحنی تراکم توان طیفی، یک پیک فرکانسی اصلی (f_1) یا فرکانس طبیعی نوسانات و یک سری پیک های فرکانسی هارمونیک (f_2) موجود است که این پیک ها بیانگر انحراف شعله از محور مرکزی و تغییر فرکانس چرخش جریان ورودی است [۱۰]. در منحنی تراکم توان طیفی، بعد از عبور از حالت گذرا و رسیدن به حالت دایمی، پیک فرکانسی اصلی به صورت طبیعی مشاهده می شود. در شکل ۶، منحنی پاسخ فرکانسی، به ازای نسبت هم آرزوی ۰/۷۶ و در ظرفیت ۱۶/۰۷ کیلووات، که از تبدیل فوریه سریع به دست آمده، نشان داده شده است. البته پیک فرکانسی اصلی در نسبت های هم آرزوی زیاد (غنی سوز) از بین می رود، چراکه شعله در نسبت های هم آرزوی زیاد به سمت خاموشی می رود که این موضوع در شکل ۷ نشان داده شده است. شکل ۶ و ۷ جزء نتایج تحقیق حاضرند.

مبنای انتخاب پیک فرکانسی اصلی به این شکل است که بیشینه مطلق پیک های فرکانسی در نظر گرفته می شود. به صورت به صورت طبیعی این پیک فرکانسی در محدوده یا باند فرکانسی مشخصی قرار می گیرد که در شعله های پیش آمیخته و آرام این محدوده فرکانسی ۷ تا ۱۱ هرتز است. این محدوده در مقالات مشابه، نظیر مقالات کادوواکی و همکاران [۱۴]، لحاظ شده است و توسط مقالات تایید می شود. علت انتخاب فرکانس های غالب شعله در این محدوده به عواملی نظیر شرایط محیطی، مثل فشار محیط، نواحی شعله شامل ناحیه پیش گرم و واکنشی، که توسط روش هایی نظیر لبه یابی به دست می آیند، و سرعت مخلوط نسوخته باز می گردد که می تواند در نوسانات شعله تاثیر گذار باشد [۱۰].

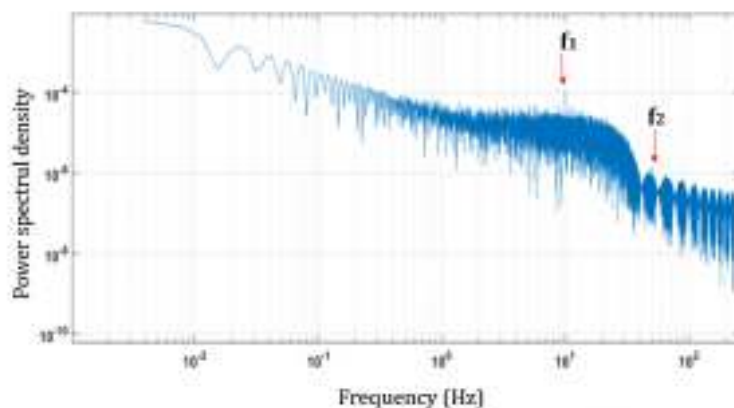


Figure 6- Power spectral density at equivalence ratio of 0.76 and burner power of 16.07 kW
 شکل ۶- نمودار توان طیفی در نسبت هم آرزوی ۰/۷۶ و ظرفیت حرارتی ۱۶/۰۷ کیلووات

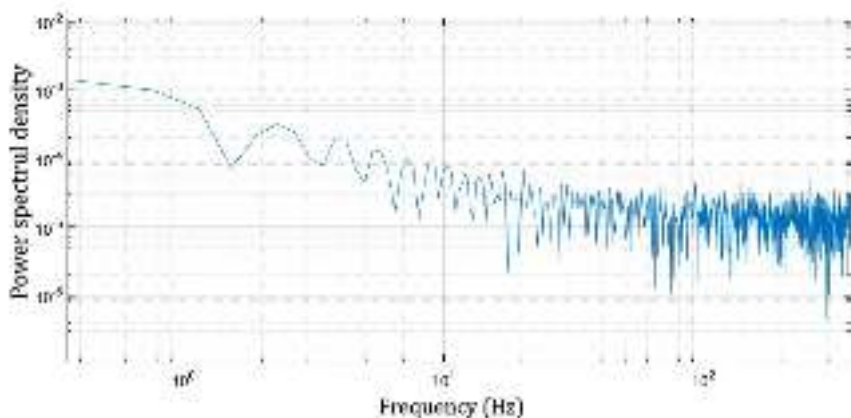


Figure 7- Power spectral density at equivalence ratio of 1.24 and burner power of 16.07 kW
 شکل ۷- نمودار توان طیفی در نسبت هم آرزوی ۱/۲۴ و ظرفیت حرارتی ۱۶/۰۷ کیلووات

فرکانس طبیعی نوسانات مشخصه‌های چرخشی پیشانی شعله را نشان می‌دهد. رفتار دینامیکی شعله پیچیده است. برای اینکه بتوانیم این رفتار را برای شعله پیش‌آمیخته نشان دهیم، شعله‌های پیش‌آمیخته به دو ناحیه شعله‌های سلولی و شعله‌های مسطح تقسیم‌بندی می‌شوند. این تقسیم‌بندی وابسته به ظرفیت حرارتی (نرخ جریان) و نسبت هم‌ارزی است [۱۴]. در شکل ۸، نمونه‌ای از تصاویر شعله سلولی و مسطح آورده شده است.

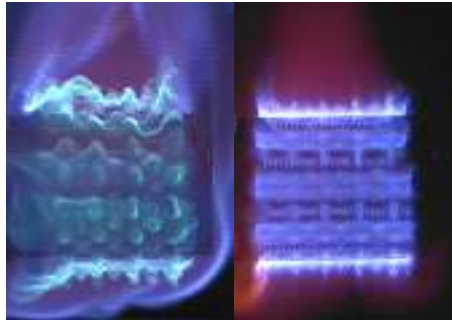


Figure 8- (right) Cellular flame at burner power 17.14 and equivalence ratio of 0.61 (left) planar flame at burner power 17.14 and equivalence ratio of 1.11

شکل ۸- شعله سلولی در ظرفیت ۱۷/۱۴ و نسبت هم‌ارزی ۰/۶۱ (سمت راست)، شعله مسطح در ظرفیت ۱۷/۱۴ و نسبت هم‌ارزی ۱/۱۱ [۲۴] (سمت چپ)

نتایج و بحث

در شعله‌های مسطح، با افزایش نرخ جریان (ظرفیت حرارتی)، فرکانس طبیعی نوسانات نیز افزایش می‌یابد، چراکه با افزایش نرخ جریان، سرعت گازهای داغ سوخته شده زیاد می‌شود. در شعله‌های سلولی، با افزایش نرخ جریان (ظرفیت حرارتی)، فرکانس طبیعی نوسانات کاهش پیدا می‌کند [۱۴]. در شکل ۹، فرکانس طبیعی نوسانات (پیک فرکانسی اصلی) برحسب نسبت‌های هم‌ارزی در ۶ ظرفیت حرارتی (نرخ جریان) مختلف مشاهده می‌شود. در جدول ۲، محدوده ظرفیت حرارتی و نرخ جریان در آزمایش‌ها آورده شده است. در مشعل استوانه‌ای، همانند مشعل مسطح، شاهد شعله‌های سلولی هستیم که با پیوستن این شعله‌ها به یکدیگر شعله‌های مسطح شکل می‌گیرد. در واقع، مشعل استوانه‌ای ورقه‌ای است که به صورت استوانه در آمده است. در نتیجه، اصطلاح شعله سلولی و شعله مسطح نیز برای سر مشعل استوانه‌ای صادق است. شعله مسطح در مرجع [۲۱] و برای مشعل شعله سطحی آمده است.

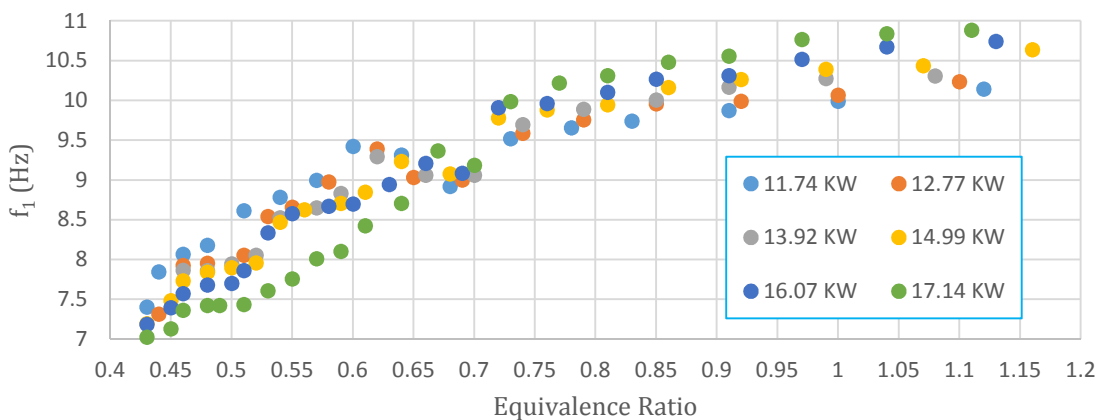


Figure 9- Relationship between the typical-oscillation frequency of fluctuations and the equivalence ratio at different burner powers

شکل ۹- رابطه بین فرکانس طبیعی نوسانات و نسبت هم‌ارزی در ظرفیت‌های حرارتی مختلف

جدول ۲- محدوده ظرفیت حرارتی و نرخ جریان در آزمایش‌ها

Table 2 burner power Range and Flow Rate in Experiments

burner power (kW)	Flow rate (cubic meters per hour)
11.74	1.1
12.77	1.2
13.92	1.3
14.99	1.4
16.07	1.5
17.14	1.6

در نسبت هم‌ارزی ۰/۹۱ و ظرفیت‌های حرارتی ۱۱/۷۴، ۱۳/۹۲، ۱۶/۰۷ و ۱۷/۱۴ مشاهده می‌شود که با افزایش ظرفیت حرارتی، فرکانس طبیعی نوسانات بیشتر می‌شود. با توجه به نکات مطرح‌شده، نسبت هم‌ارزی ۰/۹۱ در ناحیه شعله مسطح قرار دارد و پایدار است. در نسبت هم‌ارزی ۰/۴۸ و ظرفیت‌های حرارتی ۱۱/۷۴، ۱۲/۷۷، ۱۳/۹۲، ۱۴/۹۹، ۱۶/۰۷ و ۱۷/۱۴، مشاهده می‌شود که با افزایش ظرفیت حرارتی، فرکانس طبیعی نوسانات کمتر می‌شود. با توجه به نکات مطرح‌شده، نسبت هم‌ارزی ۰/۴۸ در ناحیه شعله سلولی قرار دارد و ناپایدار است. روندها در شعله‌های سلولی و مسطح با یکدیگر متفاوت است که ناشی از رفتار دینامیکی پیشانی شعله است. در واقع، عامل اصلی بالا و پایین آمدن فرکانس طبیعی نوسانات سرعت سوختن است. در ظرفیت‌های حرارتی (نرخ‌های جریان) یکسان، کاهش شدید فرکانس طبیعی نوسانات نشان‌دهنده ظهور شعله‌های سلولی است. بنابراین، امکان تشخیص گذر شعله از حالت مسطح به سلولی فراهم می‌شود. زمانی که در یک ظرفیت حرارتی (نرخ جریان) ثابت، با افزایش نسبت هم‌ارزی، شاهد افزایش فرکانس طبیعی نوسانات نباشیم، انتقال از شعله سلولی به شعله مسطح اتفاق می‌افتد که این مسئله معیار کمی انتقال از شعله سلولی به شعله مسطح است. برای نمونه، در شکل ۱۰، روند گذر از شعله سلولی به شعله مسطح، در ظرفیت حرارتی ۱۷/۱۴ کیلووات، نشان داده شده است.

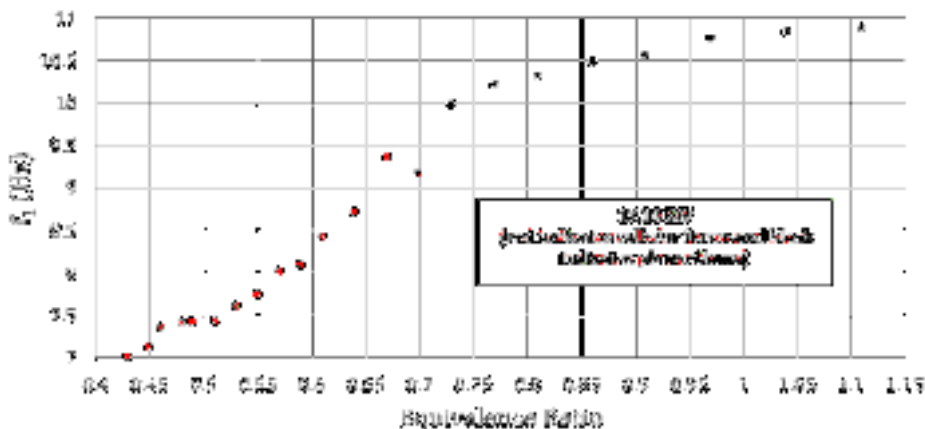


Figure 10- Transition process from cellular flame to planar flame at burner power 17.14 kW

شکل ۱۰- روند گذر از شعله سلولی به شعله مسطح در ظرفیت حرارتی ۱۷/۱۴ کیلووات

- با توجه به شکل ۹ و ۱۰، می‌توان به موارد و نکاتی به شرح ذیل اشاره کرد:
- در نسبت‌های هم‌ارزی کم و در شعله‌های سلولی، زمانی که نرخ جریان زیاد می‌شود، نرخ انتقال حرارت به سطح سر مشعل کاهش می‌یابد، چراکه بین سطح مشعل و شعله پیش‌آمیخته فاصله بیشتر می‌شود [۲۸، ۲۷].
 - در نسبت‌های هم‌ارزی بیشتر در شعله‌های مسطح، به دلیل ضعیف‌تر شدن انبساط حرارتی، انتقال حرارت نقش تعیین‌کننده‌ای روی شعله‌های پیش‌آمیخته دارد [۲۹].
 - سطح ناپایداری محل گذر از شعله سلولی به شعله مسطح است.

- اثرات اغتشاشی-دمایی یک عامل بی ثبات کننده در نسبت های هم آرزوی کم است.
 - اثرات اغتشاشی-دمایی در نسبت های هم آرزوی کم تاثیر زیادی روی ناپایداری شعله پیش آمیخته متان و هوا دارد.
 - شکل گیری شعله های سلولی باعث کاهش شدید فرکانس طبیعی نوسانات می شود یا به بیان دیگر، با کاهش شدید فرکانس نوسانات، شعله های سلولی شکل می گیرد.
 - در نسبت های هم آرزوی زیاد، که شعله به سمت خاموشی می رود، پیک های فرکانسی از بین می روند. لذا، در قسمت غنی سوز در نسبت های هم آرزوی که پیک ها از بین می روند، پایان محدوده پایداری است.
- با توجه به نکات مطرح شده، در شکل ۱۱، شعله های سلولی و مسطح، بر مبنای ظرفیت حرارتی و نسبت هم آرزوی، تقسیم بندی شده است.

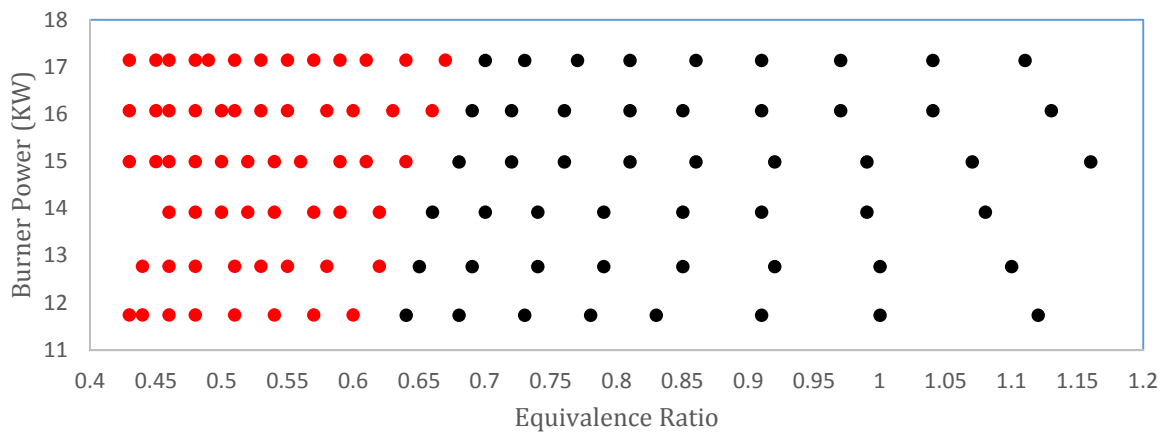


Figure 11- Classification of cellular and planar flames by burner power in terms of equivalence ratio (red indicates cellular flame and black indicates planar flame)

شکل ۱۱- تقسیم بندی شعله های سلولی و مسطح بر مبنای ظرفیت حرارتی بر حسب نسبت هم آرزوی (رنگ قرمز بیانگر شعله سلولی و رنگ سیاه بیانگر شعله مسطح)

در جدول ۳، محدوده نسبت های هم آرزوی پایدار از روش پردازش تصویر توسط نجارنیکو [۲۴] و تحلیل فرکانسی با یکدیگر مقایسه شده است. محدوده نسبت های هم آرزوی پایدار با استفاده از روش پردازش تصویر مطابق با اصول شرح داده شده در شکل ۲ است. در همین رابطه، می توان گفت که مرز پایداری، در حالت برخاستگی و در یک ظرفیت حرارتی (نرخ جریان) مشخص، از دو روش پردازش تصویر و تحلیل فرکانسی با هم تطابق دارند. محدوده نسبت های هم آرزوی پایدار با روش پردازش تصویر کوچک تر از محدوده نسبت های هم آرزوی پایدار از روش تحلیل فرکانسی است، ولی محدوده نسبت های هم آرزوی پایدار از روش تحلیل فرکانسی به طور کامل محدوده نسبت های هم آرزوی پایدار از روش پردازش تصویر را پوشش می دهد. محدوده نسبت های هم آرزوی پایدار (محدوده پایداری) با استفاده از روش نورتابی شیمیایی توسط سلطانیان [۳۰] استخراج شده است. این محدوده پایداری، به ازای ظرفیت های حرارتی مختلف، از نسبت هم آرزوی ۰/۷۸ تا ۰/۸۵ است که تاییدی بر نتایج مطرح شده است. دلیل اختلاف محدوده پایداری با استفاده از دو روش تحلیل فرکانسی و پردازش تصویر صرفا اختلاف بین شیوه استخراج محدوده پایداری از داده های به دست آمده با استفاده از روش تحلیل فرکانسی و روش پردازش تصویر است. در روش تحلیل فرکانسی، شعله بر اساس فرکانس طبیعی نوسانات به دو بخش شعله های سلولی و شعله های مسطح تقسیم بندی می شود که در آن شعله های سلولی به سمت ناپایداری پیش می رود. شعله های مسطح نیز به سمت پایداری سوق پیدا می کنند. در روش پردازش تصویر نیز، با استفاده از طیف های رنگی دریافتی از مشعل، شعله به پنج حالت شعله سبز، زرد تشعشعی، آبی پایدار، مرز برخاستگی و خاموشی تقسیم می شود.

جدول ۳- مقایسه محدوده پایداری از روش پردازش تصویر و تحلیل فرکانسی

Table 3- Comparison of the stable ϕ range of image processing and frequency analysis

burner power (kW)	Stable ϕ range using Image Processing Method	Stable ϕ range using Frequency Analysis Method
11.74	0.64-0.73	0.64-1.12
12.77	0.65-0.74	0.65-1.1
13.92	0.66-0.79	0.66-1.08
14.99	0.68-0.81	0.68-1.16
16.07	0.69-0.85	0.69-1.13
17.14	0.7-0.86	0.7-1.11

¹ Equivalence ratio

نتیجه گیری

- زمانی که نرخ جریان (ظرفیت حرارتی) افزایش می یابد، محدوده شعله سلولی عریض تر می شود. علت این مسئله آن است که سطح ناپایداری در خلال افزایش سرعت سوزش بالاتر می رود.
- در ظرفیت های حرارتی (نرخ های جریان) یکسان، کاهش شدید فرکانس طبیعی نوسانات نشان دهنده ظهور شعله های سلولی است. بنابراین، امکان تشخیص گذر شعله از حالت مسطح به سلولی، فراهم می شود.
- زمانی که در یک ظرفیت حرارتی (نرخ جریان) ثابت، با افزایش نسبت هم آرزوی، شاهد افزایش فرکانس طبیعی نوسانات نباشیم، انتقال از شعله سلولی به شعله مسطح اتفاق می افتد. شروع انتقال از شعله سلولی به شعله مسطح در ظرفیت های حرارتی ۱۱/۷۴، ۱۲/۷۷، ۱۳/۹۲، ۱۴/۹۹، ۱۶/۰۷ و ۱۷/۱۴ کیلووات به ترتیب در نسبت های هم آرزوی ۰/۶، ۰/۶۲، ۰/۶۴، ۰/۶۶ و ۰/۶۷ اتفاق می افتد. محل شروع انتقال از شعله سلولی به شعله مسطح، منطبق بر شروع ناحیه برخاستگی براساس داده های پردازش تصویر است. مشعل پیش آمیخته شعله سطحی در موارد صنعتی، مانند دیگ های چگالشی کاربرد دارد. این پژوهش، دارای جنبه های تازه ای از بررسی پایداری شعله می باشد بدون آنکه سبب اختلال در شکل شعله شود و به رژیم شعله آسیب وارد کند.

منابع

1. J. W. Robinson, *Practical handbook of spectroscopy*, CRC Press, Routledge, 2017.
2. M., el-HAMDI, M. Gorman and K. A. Robbins, "Deterministic chaos in laminar premixed flames: Experimental classification of chaotic dynamics," *Combustion science and technology*, 94, No. 1-6, 1993, pp. 87-101.
3. M. Izumikawa, T. Mitani and T. Niioka, "Experimental study on cellular flame propagation of blend fuels," *Combustion and flame*, 73, No. 2, 1988, pp. 207-214.
4. F. Williams, *Combustion Theory*, Redwood City, Addison-Wesley, 2nd Edition, CA, 1985.
5. C. Clanet and G. Searby, "First experimental study of the Darrieus-Landau instability," *Physical review letters*, 80, No. 17, 1998, pp. 3867-3870.
6. P. Clavin, "Dynamic behavior of premixed flame fronts in laminar and turbulent flows," *Progress in energy and combustion science*, 11, No. 1, 1985, pp. 1-59.
7. S. Kadowaki, "Instability of a deflagration wave propagating with finite Mach number," *Physics of Fluids*, 7, No. 1, 1995, pp. 220-222.
8. X. Qin, H. Kobayashi and T. Niioka, "Laminar burning velocity of hydrogen-air premixed flames at elevated pressure," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 21, No. 1-3, 2000, pp. 58-63.
9. G. I. Sivashinsky, "Instabilities, pattern formation, and turbulence in flames," *Annual Review of Fluid Mechanics*, 15, No.1, 1983, pp. 179-199.
10. H. Gotoda and T. Ueda, "Transition from periodic to non-periodic motion of a bunsen-type premixed flame tip with burner rotation," *Proceedings of the Combustion Institute*, 29, No. 2, 2002, pp. 1503-1509.
11. H. Gotoda and T. Ueda, "Orbital instability and prediction of a Bunsen flame tip motion with burner rotation," *Combustion and flame*, 140, No. 4, 2005, pp. 287-298.
12. F. Takens, "Detecting strange attractors in turbulence," *Lecture notes in mathematics*, 898, No. 1, 1981, pp. 366-381.
13. A. Kaewpradap and S. Kadowaki, "Heat-loss effects on the chaotic behavior of cellular premixed flames generated by intrinsic instability," *Journal of Thermal Science and Technology*, 2, No. 1, 2007, pp. 79-89.
14. S. Kadowaki and N. Ohkura, "Time series analysis on the emission of light from methane-air lean premixed flames: diagnostics of the flame instability," *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 51, No. 173, 2008, pp. 133-138.

15. S. Lee, S. M. Kum and C.-E. Lee, "An experimental study of a cylindrical multi-hole premixed burner for the development of a condensing gas boiler," *Energy*, 36, No. 7, 2011, pp. 4150–4157.
16. R. R. John and M. Summerfield, "Studies of the mechanism of flame stabilization by a spectral intensity method," *Jet Propulsion*, 25, 1955, pp. 535-540.
17. R. R. John and M. Summerfield, "Effect of turbulence on radiation intensity from propane-air flames," *Jet Propulsion*, 27, 1957, pp. 224-230.
18. I. Hurler and et al. "Sound emission from open turbulent premixed flames," in *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1968. The Royal Society.
19. A. Kaewpradap and S. Jugjai, "Effects of CH₄ and CO₂ on Intrinsic Instability of Synthetic Thai Natural Gas Flames," *The 7th TSME International Conference on Mechanical Engineering*, Chiang Mai, Thailand, 2016.
20. A. Kaewpradap and S. Kadowaki, "Instability Influenced by CO₂ and Equivalence Ratio in Oxyhydrogen Flames on Flat Burner," *Combustion Science and Technology*, 189, No. 3, 2017, pp. 438–452.
21. W. Kim et al., "Wrinkling of Large-Scale Flame in Lean Propane–Air Mixture Due to Cellular Instabilities," *Combustion Science and Technology*, 191, No. 3, 2019, pp. 491–503.
22. F. Schiro and A. Stoppato, "Experimental investigation of emissions and flame stability for steel and metal fiber cylindrical premixed burners," *Combustion Science and Technology*, 191, No. 3, 2019, pp. 453–471.
23. S. R. Turns, *An introduction to combustion*, New York, McGraw-hill, Vol. 287. 1996.
24. M. Najarniku, *Experimental analysis of a premixed perforated burner used in condensing boilers*, Ms Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, 2018. (in Persian)
25. W. Gonzalez and R. E. Woods, *Eddins, Digital Image Processing using MATLAB*, Third New Jersey, Prentice Hall, 2004.
26. H. W. Huang and Y. Zhang, "Flame colour characterization in the visible and infrared spectrum using a digital camera and image processing," *Measurement Science and Technology*, 19, No. 8, 2008, pp. 1-9.
27. G. Joulin and P. Clavin, "Linear stability analysis of nonadiabatic flames: diffusional-thermal model," *Combustion and Flame*, 35, 1979, pp. 139–153.
28. S. Sohrab and B. Chao, "Influences of upstream versus downstream heat loss/gain on stability of premixed flames," *Combustion Science and Technology*, 38, No. 5–6, 1984, pp. 245–265.
29. S. Kadowaki "The effects of heat loss on the burning velocity of cellular premixed flames generated by hydrodynamic and diffusive-thermal instabilities," *Combustion and Flame*, 143, No. 3, 2005, pp. 174–182.
30. H. Soltanian, M. Z. Targhi and H. Pasdarshahri, "Chemiluminescence usage in finding optimum operating range of multi-hole burners," *Energy*, 180, 2019, pp. 398–404.

English Abstract

Diagnosics of flame instability in a premixed surface flame burner using frequency analysis

Mohammad Hadi Badrkhahan¹, Mohammad Zabetian Targhi^{2*} and Mohammad Reza Karafi³

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, M.badrkhahan@modares.ac.ir

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Zabetian@modares.ac.ir

3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Karafi@modares.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2019.08.26, Received in revised form: 2019.12.24, Accepted: 2019.12.31)

This study investigates the stability of a surface flame burner using a photodiode and data acquisition system. The light intensity fluctuations were measured by the photodiode and, using fast Fourier transform, they were transferred from the temporal to the frequency space. To illustrate the dynamic behavior of premixed flames, flames are divided into two regions of cellular flames and surface flames. This classification is dependent on the flow rate and the equivalence ratio. In surface flames, as the flow rate increases, the oscillation frequency also increases because the hot burned gas velocity increases. In cellular flames, as the flow rate increases, oscillation frequency decreases. At identical flow rates, the sharp decrease in the oscillation frequency indicates the appearance of cellular flames so we can find the transition from the surface flame to the cellular flame. At a constant flow rate, with an increase in the equivalence ratio, there is no increase in the oscillation frequency, the transition from the cellular flame to the surface flame occurs. The initiation of the transition from the cellular flame to the surface flame occurs at flow rates of 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 m³/h and at equivalence ratios of 0.6, 0.62, 0.62, 0.64, 0.66, and 0.67, respectively. The location of the transition corresponds to the start of the liftoff zone based on the image processing. This research is innovative because it is possible to evaluate flame stability using a non-intrusive method without disturbing the flame shape and damaging the flame regime.

Keywords: Intrinsic instability, Cellular flame, Surface flame, Typical-oscillation frequency, Frequency analysis