

بررسی آزمایشگاهی پدیده خاموشی شعله مخلوط متان و هوا با حضور صفحات سوراخ‌دار و موانع متخلخل در یک محفظه بسته

هادی یونسیان^۱، محسن نظری^{۲*} و محمدمحسن شاه‌مردان^۳

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی شاهرود، Hadi_younesian@yahoo.com

۲- دکتری مهندسی مکانیک، گرایش تبدیل انرژی، دانشیار دانشگاه صنعتی شاهرود، mnazari@shahroodut.ac.ir

۳- دکتری مهندسی مکانیک، گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی شاهرود، mmshahmardan@shahroodut.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۷، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۰/۰۲/۱۰، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷)

چکیده: مطالعه و بررسی الگوی احتراق در زمان برخورد شعله با موانع برای افزایش ایمنی در صنایع مختلف از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مقاله، به بررسی تجربی رفتار خاموشی شعله با حضور موانع متخلخل و صفحات سوراخ‌دار پرداخته شده است. از یک محفظه بسته با حضور موانع متخلخل و صفحات سوراخ‌دار ۲ میلی‌متری و از یک دوربین فیلم‌برداری با سرعت بالا برای تصویربرداری از رفتار انتشار شعله استفاده شده است. تمامی آزمایش‌ها در فشار اتمسفر انجام شده است. مطابق تصاویر ثبت‌شده، شعله پس از برخورد به موانع با دو الگوی دیوارجانبی (Side wall) و نوک‌به‌نوک (head on) خاموش می‌شود. در این مطالعه، اثر موقعیت موانع از سیستم جرقه بر فاصله خاموشی شعله، الگوی خاموشی شعله و سرعت انتشار شعله مورد بررسی و آشکارسازی قرار گرفته است. موقعیت موانع متخلخل و صفحات سوراخ‌دار ۲ میلی‌متری در فاصله خاموشی شعله تأثیرگذار است. هنگامی که صفحه سوراخ‌دار در فاصله مشخصی از سیستم جرقه قرار دارد، شعله پس از انتشار و برخورد به صفحه خاموش می‌شود و در حالتی که مانع متخلخل در همین فاصله از سیستم جرقه قرار داده می‌شود، شعله پس از برخورد به مانع متخلخل، از مانع عبور می‌کند. طبق نتایج به‌دست‌آمده و عکس‌برداری‌های انجام‌شده، حضور موانع متخلخل در یک محفظه بسته نسبت به صفحات سوراخ‌دار باعث افزایش فاصله خاموشی و سرعت نوک شعله می‌شود. با حضور موانع متخلخل نسبت به صفحات سوراخ‌دار فاصله خاموشی شعله از ۱۶/۶ سانتی‌متر به ۲۵ سانتی‌متر افزایش می‌یابد. همچنین، سرعت نوک شعله در محفظه با استفاده از موانع متخلخل با افزایش حدود ۱۲۸ درصد از ۲/۵ به ۵/۷ متر بر ثانیه رسیده است.

کلیدواژگان: خاموشی شعله، الگوی خاموشی، صفحات سوراخ‌دار، موانع متخلخل، فاصله خاموشی، مخلوط متان و هوا

مقدمه

خطر احتراق گاز به‌صورت گسترده در صنایعی که با گازهای قابل اشتعال سروکار دارند وجود دارد که همواره باعث خسارت‌های جدی می‌شود. به‌منظور اجتناب از عواقب ناشی از احتراق گاز، مقادیر قابل‌توجهی از مطالعات تجربی و نظری در مورد فناوری‌های سرکوب احتراق گاز انجام شده است [۱-۴]. در حال حاضر، فناوری‌های ایزولاسیون عمدتاً یکبارمصرف‌اند و به‌تبع آن نمی‌توانند خطرات مربوط به احتراق گاز را به‌صورت مداوم کنترل کنند و عمدتاً، به همین دلیل، سالانه صدها کارگر معدن در جریان انفجار معادن زغال‌سنگ جان خود را از دست می‌دهند. در چنین شرایطی، تولید مواد و روش‌های جدید، برای کاهش و دفع احتراق گاز، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. مواد متخلخل و صفحات سوراخ‌دار اغلب در ابزارهای

گیرنده شعله مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا نسبت سطح این مواد از نسبت حجم آن‌ها بیشتر است و می‌توانند انرژی را از شعله بگیرند و در نهایت منجر به خاموش شدن شعله می‌شوند [۵-۸].

مطالعه اثر متقابل شعله با مانع برای بررسی پدیده احتراق بسیار مهم است. یک شعله از پیش بر جسته متوقف نمی‌شود مگر اینکه به یک مانع برخورد کند، زیرا تلفات گرما به اندازه کافی بزرگ است تا واکنش‌های شیمیایی را کند کند. بدین ترتیب، جبهه شعله خاموش می‌شود. پدیده خاموشی شعله به پارامترهای زیادی از قبیل مشخصات سطح (دما و هندسه سطح) و محیط سوزش (دما، فشار، ترکیب و کشش شعله) بستگی دارد [۹]. هنگامی که شعله به یک مانع برخورد می‌کند، شعله به دو صورت ممکن است خاموش شود. به طور کلی دو الگوی خاموشی را می‌توان برای مخلوط متان و هوا در نظر گرفت: دیوار جانبی^۱ و نوک به نوک^۲. تا به امروز چندین مطالعه اساسی و کاربردی در مورد خاموشی شعله انجام شده است [۹].

در بررسی پدیده احتراق، پدیده خاموشی شعله برای بهینه‌سازی احتراق و کاهش مقدار هیدروکربن‌های سوخته در موتورهای احتراق داخلی نیاز به مطالعات دقیق‌تری دارد [۱۰، ۱۱].

در پدیده خاموشی شعله، دو مقدار مهم معرفی شده است: حداقل فاصله‌ای که انتشار شعله پس از برخورد به مانع متوقف می‌شود (فاصله خاموشی) و حداکثر شار گرما به مانع. بسیاری از تحقیقات نظری و تجربی قبلی منجر به نتایجی از قبیل خاموشی شعله در لوله‌ها و بین دو صفحه موازی شده‌اند [۱۲-۱۴]. در این مطالعات، فاصله خاموشی به عنوان حداقل فاصله بین صفحات (یا حداقل قطر لوله) برای خاموش کردن شعله اندازه‌گیری شده است. در تحقیقات انجام شده، رابطه بین فاصله خاموشی و مقادیری از قبیل دمای دیواره، فشار گاز، نسبت هم‌ارزی و غیره بحث شده است [۱۵]. برخی روابط تجربی تأثیر فشار، دمای دیواره و نوع سوخت را در فاصله خاموشی تخمین زده‌اند [۱۶-۱۸].

وسن و همکاران [۱۹] فاصله خاموشی را با توجه به میزان شار گرما مورد ارزیابی قرار دادند. طبق نتایج مطالعات آن‌ها، داده‌ها با استفاده از سرعت انتشار حرارت شعله قبل از خاموشی شعله در ارتباط‌اند و حداکثر شار گرما مربوط به فاصله خاموش شدن است. بنابراین، می‌توان از اندازه‌گیری‌های فاصله خاموشی برای پیش‌بینی حداکثر شار گرما استفاده کرد. همچنین، انتشار حرارتی و میزان واکنش شیمیایی احتراق فرایندهای غالب‌اند که شار گرما را در هنگام خاموشی تعیین می‌کنند.

اینوموتو و همکاران [۲۰] حالت‌های مختلف خاموشی با استفاده از یک مانع را مورد بررسی قرار دادند. طبق مطالعات آن‌ها، هنگامی که شعله به حالت دیواره جانبی خاموش می‌شود، در این حالت، ضخامت منطقه پیش‌گرم بزرگ‌تر از شعله آدیاباتیک است و کاهش سرعت سوزش ناشی از کشش شعله آشکارتر می‌شود.

کلیری و همکاران [۲۱] خاموشی شعله مخلوط متان و هوا را با استفاده از یک مانع مورد مطالعه قرار دادند. شایان ذکر است که در این مطالعه فاصله خاموشی شعله از ۰/۱۰۵ میلی‌متر تا ۰/۲۳ میلی‌متر متغیر است.

مطالعات بلنیوس و همکاران و بوست و همکاران [۲۲، ۲۳] نشان داد که افزایش فشار باعث کاهش فاصله خاموشی شعله می‌شود. اثرات درجه حرارت سطح نیز در طول مطالعه گزارش شده است. به طور کلی افزایش دمای مانع باعث کاهش فاصله خاموشی می‌شود. آزمایش‌های بلنیوس و همکاران نشان داد که زمانی که الگوی خاموشی شعله نوک به نوک است، جنس مانع حتی در دمای ۳۰۰ درجه کلوین نیز فاصله خاموشی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

نتایج کیم و همکاران [۲۴] نشان می‌دهد که چنین تأثیراتی ضعیف است تا زمانی که مانع به اندازه کافی به دمای بالا، تقریباً ۹۰۰ درجه کلوین، برسد تا واکنش سطح را فعال کند. دمای بالاتر از چنین درجه حرارتی، باعث کاهش شدید فاصله خاموشی می‌شود. آزمایش‌های کیم و همکاران نشان داد که در صورت فعال بودن واکنش سطح جنس مانع نقش مهمی در تعیین فاصله خاموشی دارد.

1. Sidewall
2. Head-on

فن و همکاران [۲۵]، با توسعه روش‌های آزمایشگاهی، انتشار شعله و پدیده خاموشی را برای سوخت متان و هوا در کانال‌های کوارتز بسیار نازک بررسی کردند. هدف اصلی آن‌ها، توسعه سیستم‌های اندازه‌گیری اپتیکی و مشاهداتی برای انتشار شعله متان و هوا درون کانال‌های کوارتز خیلی نازک بود. در مطالعه فن و همکاران، حدهای شعله‌وری برای نسبت هم‌ارزی و سرعت‌های ورودی مختلف به دست آمد. مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که حدهای شعله‌وری برای کانال‌های نازک‌تر، باریک‌تر و برای دماهای بالاتر، پهن‌تر می‌شود. نوسانات شعله به صورت فرایندی تکراری در کانال‌های نازک مشاهده و این فرایند در سه مرحله تفسیر شد. مرحله اشتعال شامل آغازش و انتشار شعله به شکل کروی، مرحله انتشار شامل انتشار شعله در جهت‌های بالادست و پایین‌دست جریان و به دنبال آن خاموشی شعله و مرحله شارژ مجدد شامل ورود مخلوط گازی تازه به درون کانال است.

بیگ محمدی و همکاران [۲۶] شتاب شعله پیش‌مخلوط پروپان-هوا را از انتهای بسته تا باز در مراحل اولیه سوزاندن در لوله‌های اندازه کوچک با دیواره‌های هم‌دما مورد مطالعه قرار دادند. به طور خاص، اثرات شعاع لوله، شرایط دیواره (لغزنده/غیرلغزنده) و دمای دیواره بر انتشار و شکل شعله به صورت عددی بررسی شد. پنج مرحله از انتشار شعله مشاهده شد: (۱) گسترش کروی جلوی شعله، (۲) گسترش انگشت جلوی شعله قبل از لمس دیواره، (۳) انتشار شعله در لوله تحت تأثیر فعل‌وانفعالات شعله و دیواره، (۴) تبدیل شکل شعله به شکل لاله و (۵) تبدیل شعله شکل لاله به انگشت. نتایج نشان می‌دهد که شعاع لوله، شرایط دیواره و درجه حرارت آن به طور قابل توجهی بر رژیم انتشار شعله حتی در اولین مورد از انتشار شعله در لوله‌ها تأثیر می‌گذارد. همچنین، افزایش شعاع لوله باعث افزایش سرعت انتشار شعله در لوله‌های هم‌دما می‌شود.

بیگ محمدی و همکاران [۲۷] اثر افزودن اکسیژن به مخلوط پروپان-هوا، پارامترهای هندسی و نسبت هم‌ارزی بر پویایی شعله مخلوط پروپان-هوا/اکسیژن را در رآکتورهای در مقیاس غیرآدیاباتیکی به طور آزمایشی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش اکسیژن به ۴۰ تا ۸۰ درصد می‌تواند به طور کلی باعث ایجاد انواع رژیم‌های شعله و همچنین باعث بهبود ثبات شعله در رآکتورهای در مقیاس غیرآدیاباتیکی شود. همچنین، نتایج نشان داد که افزایش قطر داخلی رآکتور و نسبت هم‌ارزی به طور کلی باعث افزایش پایداری شعله پروپان-هوا و اکسیژن در رآکتورهای مقیاس متوسط غیرآدیاباتیکی می‌شود. علاوه بر این، نشان داده شد که افزایش طول رآکتور و همچنین افزایش اکسیژن تا بیش از ۴۰ درصد به مخلوط پروپان-هوا باعث بی‌ثباتی شعله و در نتیجه محدودیت شعله پروپان-هوا-اکسیژن در رآکتورهای در مقیاس متوسط غیرآدیاباتیکی می‌شود.

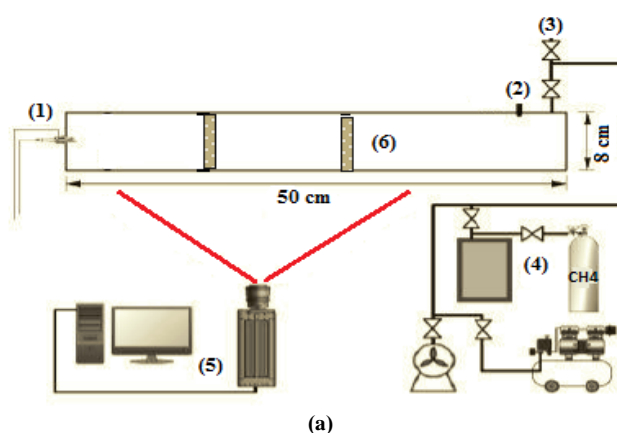
کلاهدوز و همکاران [۲۸] انتشار شعله و شکل جبهه شعله مخلوط متان-هوا در محفظه بسته و اثر مانع متخلخل با درصد تخلخل ۷۹٫۵ را در آزمایشگاه مورد بررسی قرار دادند. رفتار شعله با کمک عکس‌برداری با دوربین پرسرعت بررسی شده است. محل مانع متخلخل برای فواصل مختلف ۵ سانتی‌متر، ۱۵ سانتی‌متر، ۱۰ سانتی‌متر و ۲۰ سانتی‌متر از نقطه جرقه آزمایش شده است. نتایج برای چهار حالت با حضور مانع متخلخل نشان می‌دهد که آشفستگی ایجادشده در میدان جریان می‌تواند موقعیت مکانی تشکیل شعله لاله‌گون و همچنین زمان تشکیل آن را جابه‌جا کند. برای فاصله ۲۰ سانتی‌متری مانع متخلخل از محل جرقه، آشفستگی میدان جریان به میزان حداکثر خود در بین ۴ فاصله مختلف مانع رسیده و جبهه شعله با تفاوت اساسی مشابه شعله لاله‌گون کلاسیک تشکیل می‌شود.

تاکنون، مطالعاتی در مورد تأثیر متقابل شعله و صفحات سوراخ‌دار انجام شده است. در همین حال، خاموش شدن شعله با استفاده از صفحات سوراخ‌شده به ندرت مورد مطالعه قرار گرفته است. بنابراین، در این مقاله، به منظور بررسی پدیده انتشار و خاموش شدن شعله با استفاده از صفحات سوراخ‌دار، با در نظر گرفتن قطرهای مختلف منافذ، یک محفظه بسته با دو صفحه سوراخ‌دار ۲ میلی‌متری طراحی شده است. در این آزمایش، از مخلوط هوا و متان برای مطالعه انتشار و خاموش شدن شعله از طریق صفحه سوراخ‌دار استفاده می‌شود. تأثیر موقعیت صفحات سوراخ‌دار بر الگوی خاموشی، سرعت شعله و فشار احتراق نیز در نظر گرفته شده است. مطالعه حاضر می‌تواند برای جلوگیری از احتراق و افزایش ایمنی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار

گیرد. در این مقاله، ابتدا، در قسمت دستگاه و شرایط آزمایشگاهی، شرایط و دستگاه مورد تحلیل قرار می‌گیرد. سپس، موقعیت صفحات سوراخ‌دار و تأثیرات آن‌ها در سرعت و خاموش شدن شعله کاملاً بیان می‌شود.

تجهیزات آزمایشگاهی

تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۱ در یک نمای کلی نشان داده شده است. محفظه احتراق ۵۰ سانتی‌متر طول، ۸ سانتی‌متر ارتفاع و ۱۱ سانتی‌متر عمق دارد. در این مطالعه، از دو نوع مانع (صفحه سوراخ‌دار و متخلخل) با سه ویژگی مشترک در میزان درصد تخلخل و همسانی ضخامت صفحات به اندازه ۲ میلی‌متر و همچنین تشابه جنس صفحات از نوع آلیاژ آلومینیوم استفاده شده است. در این مقاله، برای بررسی روند انتشار شعله و سرعت شعله، صفحات سوراخ‌دار و موانع متخلخل طبق شکل ۲ در موقعیت‌های مختلف A و B قرار می‌گیرند.



(a) Figure 1- A) Schematic view of the laboratory system: 1. Ignition system including spark plug, 2. Pressure sensor, 3. Gas inlet and outlet, 4. Gas injection, 5. High speed PCO camera, 6. Perforated plates or porous barriers and B) Real view of laboratory system

شکل ۱- الف) نمای کلی سیستم آزمایشگاهی: ۱- سیستم احتراق شامل شمع، ۲- سنسور فشار، ۳- ورودی و خروجی گاز، ۴- تزریق گاز، ۵- دوربین سرعت بالا PCO و ۶- صفحات سوراخ‌شده یا موانع متخلخل و ب) نمای واقعی سیستم آزمایشگاهی

در شکل ۲، موقعیت‌های قرارگیری صفحات سوراخ‌دار و موانع متخلخل در محفظه بسته نشان داده شده است. در موقعیت A، موانع در فاصله ۱۶/۶ سانتی‌متری از یکدیگر قرار دارند. در موقعیت B، اولین صفحه سوراخ‌شده در فاصله ۲۵ سانتی‌متری از جرقه قرار دارد و صفحه دوم سوراخ‌شده در فاصله ۳۳/۳ سانتی‌متری از جرقه قرار گرفته است.

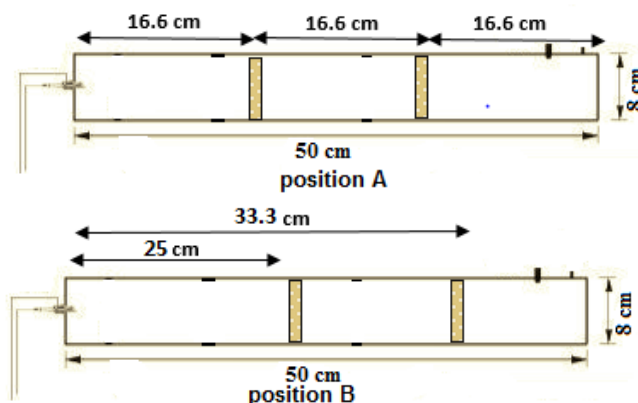


Figure 2- Positions of perforated plates and 2 mm porous barriers in a closed chamber
شکل ۲- موقعیت‌های قرارگیری صفحات سوراخ‌دار و موانع متخلخل ۲ میلی‌متری در محفظه بسته

جنس ورق مورد استفاده در ساخت محفظه، فولاد ضدزنگ ۳۰۴ به ضخامت ۱۵ میلی‌متر است. سطوح داخلی محفظه با استفاده از ساینده با درجه زبری ۴۰۰ به‌طور کامل صیقل داده شده است. برای امکان تصویربرداری از شعله، یک وجه محفظه (۵۰×۸ cm) از جنس پلکسی گلس شفاف با ضخامت ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است. به‌منظور مطالعه رفتار انتشار جبهه شعله و خاموشی شعله با وجود موانع، دو صفحه سوراخ‌دار و دو مانع متخلخل با قطر منافذ ۲ میلی‌متر در دو موقعیت A و B در محفظه نصب شده است.

در شکل ۳، نمای کلی و واقعی از موانع متخلخل و صفحات سوراخ‌دار ۲ میلی‌متری نشان داده شده است. مانع متخلخل با استفاده از مدل کلون طراحی شده است که ساختار منظم دارد و از کنارهم قرارگرفتن سلول‌ها و حفره‌ها ایجاد شده است و در نهایت ساختار متخلخل شکل می‌گیرد که می‌توان با افزایش و کاهش آن درصد تخلخل را کنترل و تغییر داد. این صفحات با دقت ۰/۰۳ میلی‌متر با استفاده از ماشین CNC مدل HUEY LONG طراحی و اجرا شده است.

برای ایجاد جرقه از شمع که در مرکز وجه ابتدایی محفظه واقع شده و ترانسفورماتور ولتاژبالا استفاده شده است. عکس‌برداری به‌کمک دوربین dimax-S با قابلیت عکس‌برداری رنگی و سرعت ۴۵۰۰ فریم بر ثانیه بوده که برای کار حاضر، با توجه به سرعت انتشار شعله و حفظ کیفیت تصاویر، عکس‌برداری با سرعت ۱۰۰۰ فریم بر ثانیه انجام شده است. تغییرات فشار داخل محفظه به‌کمک مبدل فشار WIKA مدل S-10، که در رنج فشار ۰-۱۰ بار اندازه‌گیری انجام می‌دهد، استفاده شده و در دیواره بالای محفظه در فاصله ۱۵ سانتی‌متری از انتهای محفظه نصب شده است. برای ثبت اطلاعات در رایانه از ثبت‌کننده اطلاعات ADAM مدل ۶۰۱۷ استفاده شده است. در تهیه مخلوط متان-هوا، برای تزریق گاز متان از یک انژکتور مستقیم شش‌سوراخ طبق شکل ۴ استفاده شده است. در این آزمایش، از فشار هوای اتمسفریک داخل محفظه استفاده شده است.

برای تهیه مخلوط سوخت و هوا در نسبت هم‌ارزی مشخص، از روش فشار جزئی گازها در شرایط آرمانی (گاز ایدئال) استفاده می‌شود. در مخلوط چند گاز در یک محفظه بسته معادلات (۱) تا (۳)، براساس الگوی دالتون، حاکم است:

$$V=V_1=V_2=\dots=V_n \quad (1)$$

$$P=P_1+P_2+\dots+P_n \quad (2)$$

$$P_i=x_iP \quad (3)$$

در روابط بالا، V حجم، P فشار، x_i کسر مولی جزء i و n تا تعداد گازهای موجود در مخلوط است. بنابراین، با توجه به رابطه (۴)، فشار هر جزء با ضرب فشار کل در کسر مولی حاصل شد [۲۹].

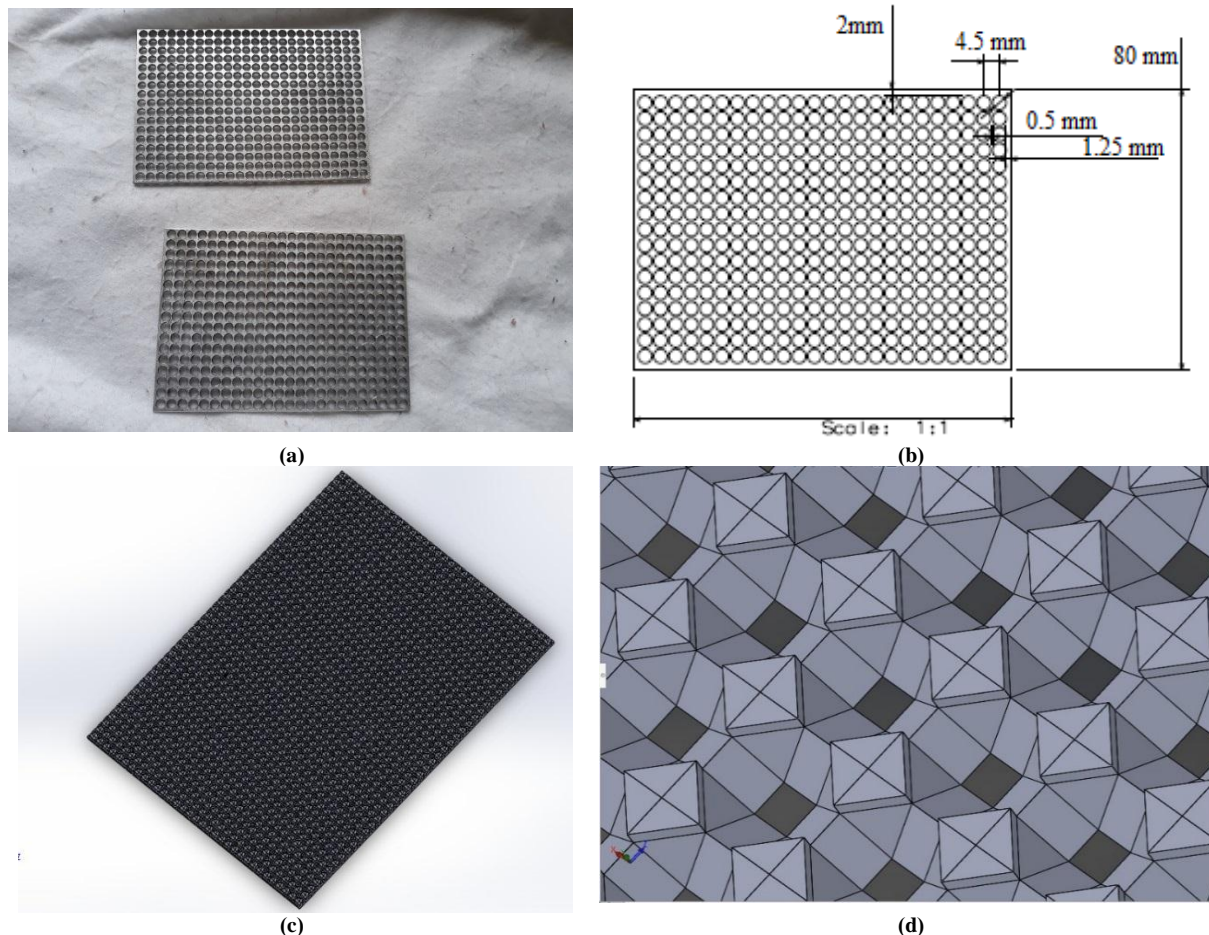


Figure 3- Schematic view and actual view of perforated plates and porous barrier: A) Real view of perforated plate, B) Schematic view of perforated plate, C) Real view of porous barrier, D) Schematic view of porous barrier

شکل ۳- نمای کلی و نمای واقعی صفحات سوراخ دار و مانع متخلخل

الف) نمای واقعی صفحه سوراخ دار، ب) نمای کلی صفحه سوراخ دار، ج) نمای واقعی مانع متخلخل، د) نمای کلی مانع متخلخل

مخلوط گازی مورد نظر برای این آزمایش مخلوط متان و هوا خواهد بود که واکنش یک مرحله‌ای آن به صورت زیر است:



آزمایش‌ها برای مخلوط استکیومتری (نسبت هم‌ارزی یک) در فشار اولیه ۱ بار و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام خواهد شد. برای آماده‌سازی مخلوط برای شرایط دلخواه می‌توان با فرض گاز ایدئال (با توجه به فشار و دمای پایین) از فشارهای جزئی برای میزان تزریق گاز استفاده کرد که می‌توان به شرح ذیل فشارهای جزئی را محاسبه کرد:

$$P_{\text{CH}_4} = y_{\text{CH}_4} * P, \quad P_{\text{air}} = y_{\text{air}} * P \quad (5)$$

Y کسر مولی گونه‌های شیمیایی است که در حالت استوکیومتریک برای متان خالص در مخلوط مورد نظر به صورت زیر

خواهد بود:

$$Y_{\text{CH}_4} = n_{\text{CH}_4} / n_t = \frac{1}{10.52} = 0.095 \quad (6)$$

بنابراین، در تمام مراحل آزمایش میزان متان مورد استفاده در محفظه ۹/۵ درصد و ثابت است. در فشار اولیه محفظه (فشار ورودی) فشار جزئی هوا و متان به شرح جدول ۱ خواهد بود. برای اطمینان از صحت کلیه ابزارهای اندازه‌گیری، آزمایش‌ها حداقل سه بار تکرار شده‌اند.

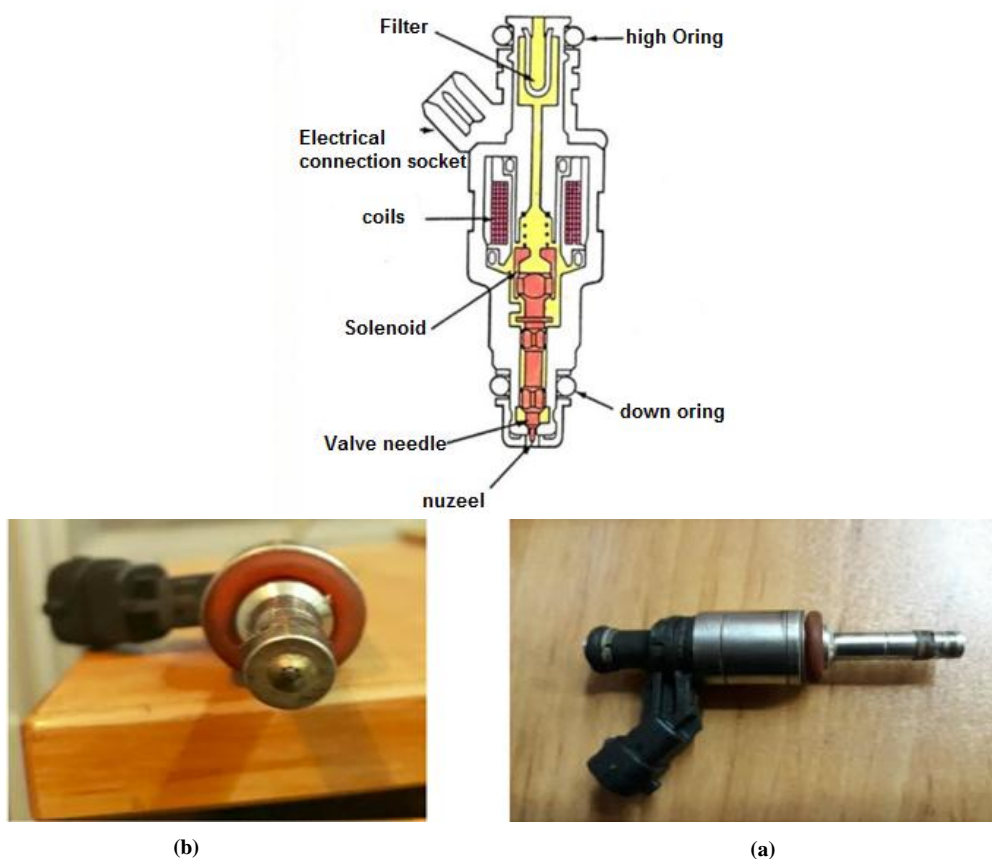


Figure 4- a) Two-dimensional figure of a six-hole direct injector with details and b) The actual shape of a six-hole direct injector with details for injecting methane gas into the chamber

شکل ۴- الف) شکل دوبعدی انژکتور مستقیم شش سوراخه با جزئیات و ب) شکل واقعی انژکتور مستقیم شش سوراخه با جزئیات برای تزریق گاز متان به داخل محفظه

جدول ۱- فشارهای جزئی هوا و متان در نسبت هم‌ارزی یک

Table 1- Results of partial pressures in the equivalence ratio one

Equivalence ratio	Total initial pressure (bar)	Partial pressure of methane (bar)	Partial pressure of air (bar)
1.1	0.964	0.099	0.865

انحراف معیار (SD)، مقدار خطای استاندارد (SE) و فاصله اطمینان (CI) با سطح اطمینان ۹۵٪ نیز با استفاده از معادلات (۷) تا (۹) محاسبه می‌شوند.

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (7)$$

$$SE = \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

$$CI = SE \times 4.303 \quad (9)$$

در معادلات فوق، \bar{x} مقدار متوسط و n تعداد تکرار آزمون هاست. عدد $4/303$ با سطح اطمینان 95% با جدول مطابقت دارد. عدم اطمینان حاصل از خطای اندازه‌گیری دستگاه تقسیم بر فاصله اندازه‌گیری دستگاه را می‌توان برای هر مورد به شرح زیر محاسبه کرد:

- ۱- فشارسنج مورد استفاده دارای دامنه $0-6$ بار است و دارای خطای 1% با مقدار عدم قطعیت $0/16$ است. ذکر این نکته لازم است که این مقدار برای محاسبات خاص استفاده نشده و فقط برای تنظیم نسبت فشار هوای نسبی متان استفاده شده است.
- ۲- سنسور فشار نیز دارای دامنه $0-10$ بار و خطای $2/0$ است. عدم اطمینان برای سنسور فشار نیز $2/0$ خواهد بود.

نتایج

برای بررسی پدیده خاموشی شعله، روند انتشار شعله با استفاده از صفحات سوراخ‌شده و موانع متخلخل 2 میلی‌متری به ترتیب در دو موقعیت مختلف A و B بررسی شد. شکل ۵ و ۶ روند انتشار شعله احتراق مخلوط متان/هوا را در دو موقعیت A و B با حضور موانع متخلخل و صفحات سوراخ‌دار 2 میلی‌متری نشان می‌دهد. در شکل ۵، از دو صفحه سوراخ‌دار 2 میلی‌متری در طول محفظه بسته استفاده شده است. در موقعیت A، مانع اول در فاصله $16/6$ سانتی‌متری و مانع دوم در فاصله $33/3$ سانتی‌متری از سیستم جرقه قرار گرفته است. شعله پس از برخورد به مانع اول خاموش می‌شود و از مانع اول عبور نمی‌کند. در موقعیت B، مانع اول در فاصله 25 سانتی‌متری و مانع دوم در فاصله $33/3$ سانتی‌متری از موقعیت جرقه قرار گرفته است. در این حالت نیز شعله از مانع اول رد نمی‌شود و خاموشی شعله پس از برخورد به مانع اول، به دلیل تلفات حرارتی و سرد شدن جبهه شعله، رخ می‌دهد. طبق شکل ۵ فرم d الگوی خاموشی در هر دو موقعیت A و B به صورت نوک‌به‌نوک است، زیرا مانع اول در نزدیکی موقعیت جرقه قرار گرفته است و موقعیت قرارگیری مانع دوم در تغییر الگوی خاموشی شعله بی‌تأثیر است.

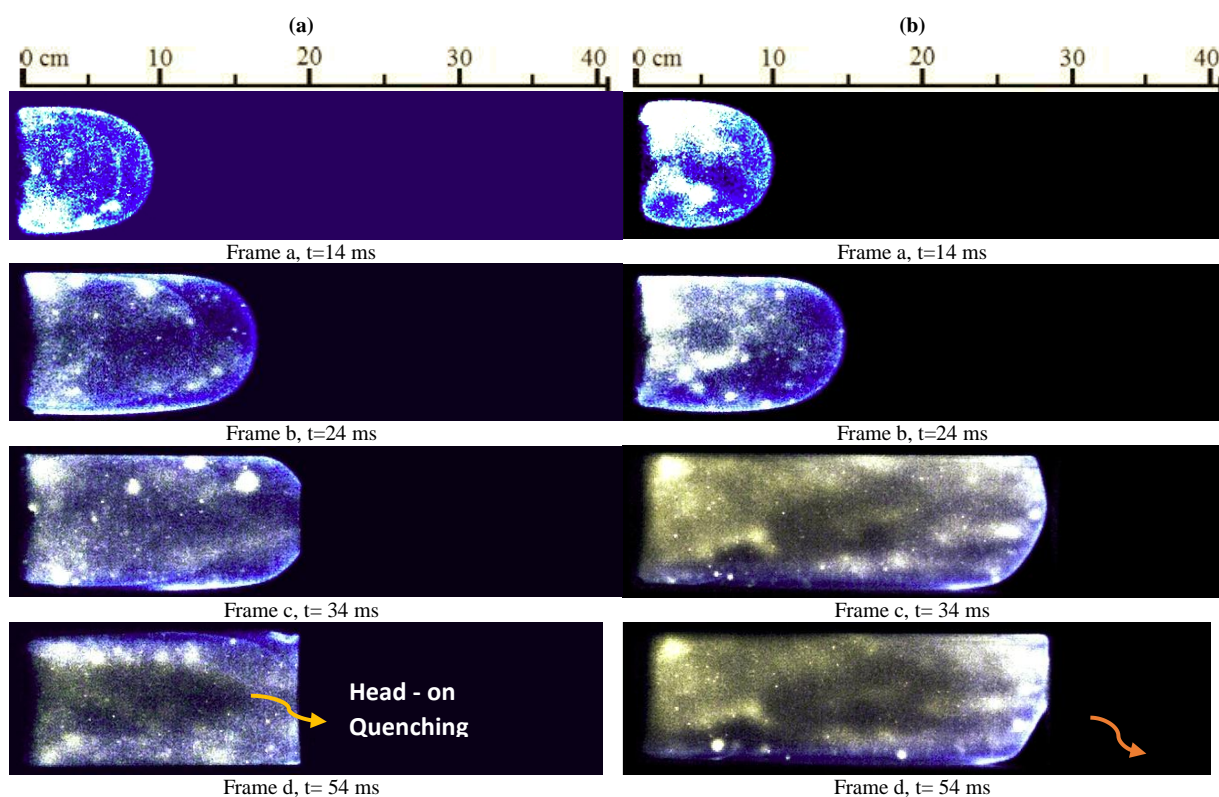


Figure 5- Flame diffusion of a mixture of methane and air with the presence of 2 mm perforated plates in a closed chamber: A) Position A and b) Position B

شکل ۵- انتشار شعله مخلوط متان و هوا با حضور صفحات سوراخ‌دار 2 میلی‌متری در محفظه بسته: الف) موقعیت A و ب) موقعیت B

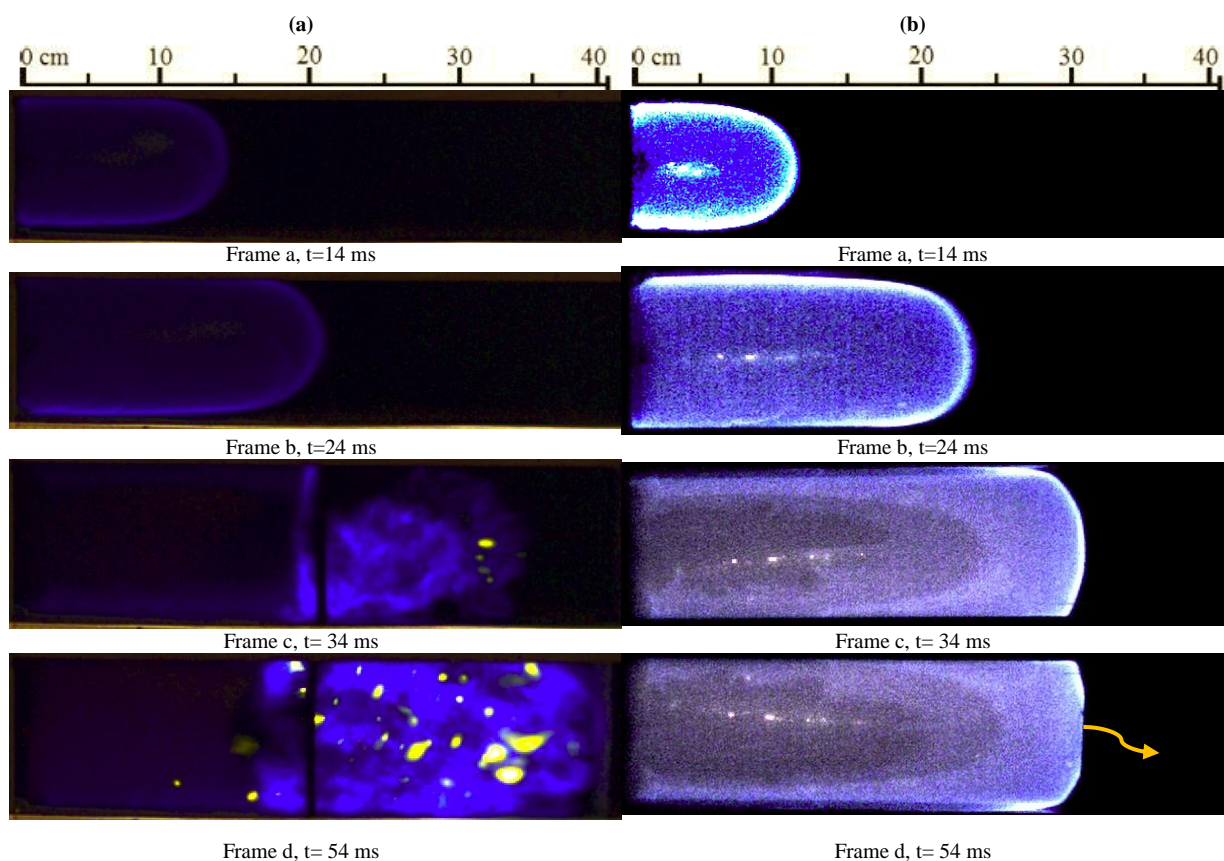


Figure 6- Flame diffusion of a mixture of methane and air in the presence of 2 mm porous barriers in a closed chamber. A) Position A and b) Position B

شکل ۶- انتشار شعله مخلوط متان و هوا با حضور موانع متخلخل ۲ میلی‌متری در محفظه بسته: الف) موقعیت A و ب) موقعیت B

در شکل ۶، از دو مانع متخلخل ۲ میلی‌متری در طول محفظه بسته استفاده شده است. در موقعیت A، مانع اول در فاصله ۱۶/۶ سانتی‌متری و مانع دوم در فاصله ۳۳/۳ سانتی‌متری از موقعیت جرقه قرار گرفته است. در موقعیت B، مانع اول در فاصله ۲۵ سانتی‌متری و مانع دوم در فاصله ۳۳/۳ سانتی‌متری از موقعیت جرقه قرار گرفته است. در موقعیت A، شعله پس از برخورد به اولین مانع متخلخل از مانع رد شده و تشکیل شعله جت و آشفته را می‌دهد و سپس پس از برخورد به مانع دوم خاموش شده و از مانع دوم رد نمی‌شود. در موقعیت B، شعله از مانع اول رد نمی‌شود و خاموشی شعله پس از برخورد به مانع اول، به دلیل تلفات حرارتی و سرد شدن جبهه شعله، رخ می‌دهد. جنس موانع متخلخل مورد استفاده از آلومینیوم است. آلومینیوم دارای رسانایی حرارتی بالایی است که باعث می‌شود گرمای شعله در پدیده احتراق بیشتر به دیواره‌های منافذ فلزی و ساختارهای مجاور محیط متخلخل منتقل شود. این بدان معناست که مکانیسم غالب برای خاموش شدن شعله در محیط متخلخل به احتمال زیاد انتقال حرارت بین شعله و مانع متخلخل است. الگوی خاموشی شعله، مطابق آزمایش‌های انجام شده، در هر دو موقعیت B به شکل نوک‌به‌نوک است که این حالت مطابق مطالعات لی و همکاران [۳۰] به دلیل تأثیر عدد لوئیس بر خاموشی شعله است. به این صورت که برای مخلوط متان و هوا با عدد لوئیس بزرگ‌تر از یک (مخلوط به‌اندازه کافی غنی است) هنگام انتشار شعله، سرعت شعله افزایش می‌یابد و شعله پس از برخورد با مانع اول، به دلیل داشتن سرعت بالا، به صورت نوک‌به‌نوک خاموش می‌شود. بنابراین، هرچه مانع به موقعیت جرقه نزدیک باشد، به دلیل سرعت بالای شعله، الگوی خاموشی شعله به شکل نوک‌به‌نوک است.

شکل ۷ و ۸ سرعت نوک شعله را در موقعیت‌های مختلف با حضور صفحه سوراخ‌دار و موانع متخلخل ۲ میلی‌متری نشان می‌دهد. هنگامی که صفحات سوراخ‌دار ۲ میلی‌متری در فاصله ۱۶/۶ سانتی‌متری و ۳۳/۳ سانتی‌متری از موقعیت جرقه قرار دارد، بیشینه سرعت شعله ۲/۵ متر بر ثانیه است. با افزایش فاصله صفحات سوراخ‌دار به ۲۵ سانتی‌متری از موقعیت جرقه، بیشینه سرعت شعله به ۴/۵ متر بر ثانیه می‌رسد. هنگامی که مانع متخلخل ۲ میلی‌متری در فاصله ۱۶/۶ سانتی‌متری از موقعیت جرقه قرار دارد، شعله از مانع اول عبور کرده و بیشینه سرعت شعله به ۵/۷ متر بر ثانیه رسیده است و در نهایت هنگامی که مانع متخلخل ۲ میلی‌متری در فاصله ۲۵ سانتی‌متری از موقعیت جرقه دارد، شعله پس از برخورد به مانع اول خاموش شده و بیشینه سرعت شعله به ۵ متر بر ثانیه رسیده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، حضور موانع متخلخل در محفظه بسته باعث افزایش فاصله خاموشی می‌شود.

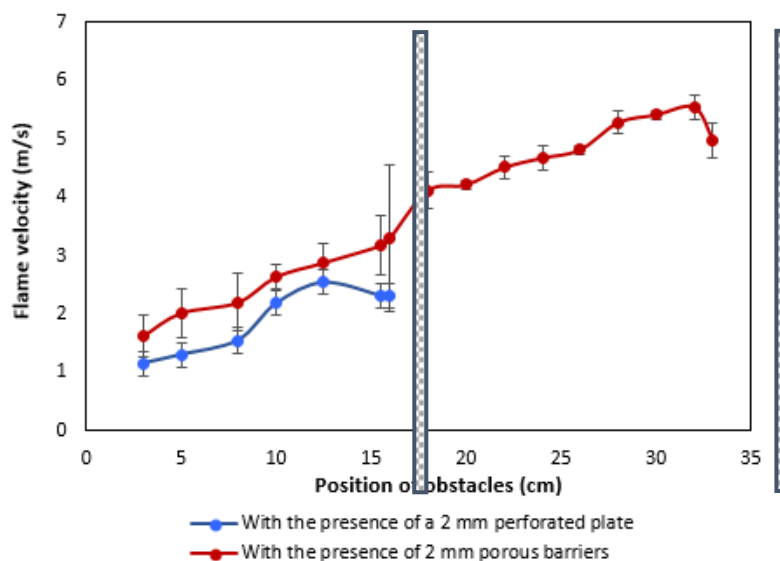


Figure 7- Flame tip speed at different distances from the spark with the presence of a perforated plate and 2 mm porous barriers
شکل ۷- سرعت نوک شعله در فاصله‌های مختلف از جرقه با حضور صفحه سوراخ‌دار و موانع متخلخل ۲ میلی‌متری

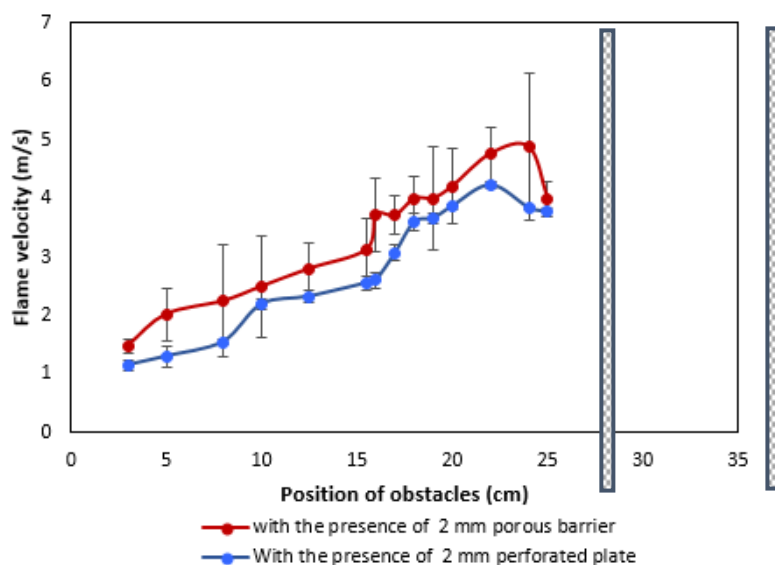


Figure 8- Flame tip speed at different distances from the spark with the presence of a perforated plate and 2 mm porous barriers
شکل ۸- سرعت نوک شعله در فاصله‌های مختلف از جرقه با حضور صفحه سوراخ‌دار و موانع متخلخل ۲ میلی‌متری

طبق مطالعات کینو و همکاران [۳۱] عدد فرود^۱ بر شکل خاموشی شعله و سرعت انتشار شعله تأثیرگذار است. عدد فرود به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود:

$$Fr = \frac{gw}{U_f^2} \quad (10)$$

که در این رابطه g شتاب گرانشی ($g=9.81 \text{ m/s}^2$)، w ارتفاع محفظه احتراق و U_f سرعت جبهه شعله است. شکل ۸ نشان می‌دهد که در ابتدای انتشار شعله سرعت جبهه شعله در هر دو حالت (با حضور صفحات سوراخ‌دار و موانع متخلخل) حدود ۱/۵ متر بر ثانیه است و سرانجام با حضور موانع متخلخ به حداکثر ۴/۵ متر بر ثانیه می‌رسد. بنابراین، شعله با سرعت ۱/۸ متر بر ثانیه در حال رشد است. بنابراین، طبق معادله (۸)، عدد فرود ۰/۳۳۳ است. مقدار محاسبه شده عدد فرود با عدد بحرانی فرود، که توسط جین و همکاران [۳۲] محاسبه شده است، بسیار نزدیک است که برای مخلوط متان و هوا ۰/۳ است. شکل ۹ فشار داخل محفظه احتراق در برابر زمان را با حضور صفحه سوراخ‌دار ۲ میلی‌متری در فشار اولیه ۱/۱ بار در فواصل مختلف از سیستم اشتعال نشان می‌دهد. در این آزمایش یک سنسور فشار (Wika Model S-10) در فاصله ۱۵ سانتی‌متری از انتهای محفظه احتراق بر روی دیواره فوقانی محفظه احتراق نصب شده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش اندازه فاصله صفحه سوراخ‌دار از سیستم اشتعال، فشار محفظه احتراق کاهش می‌یابد، به طوری که در فاصله ۲۵ سانتی‌متری از سیستم اشتعال، فشار احتراق از ۲/۹۷ بار به ۲/۴۵ بار می‌رسد.

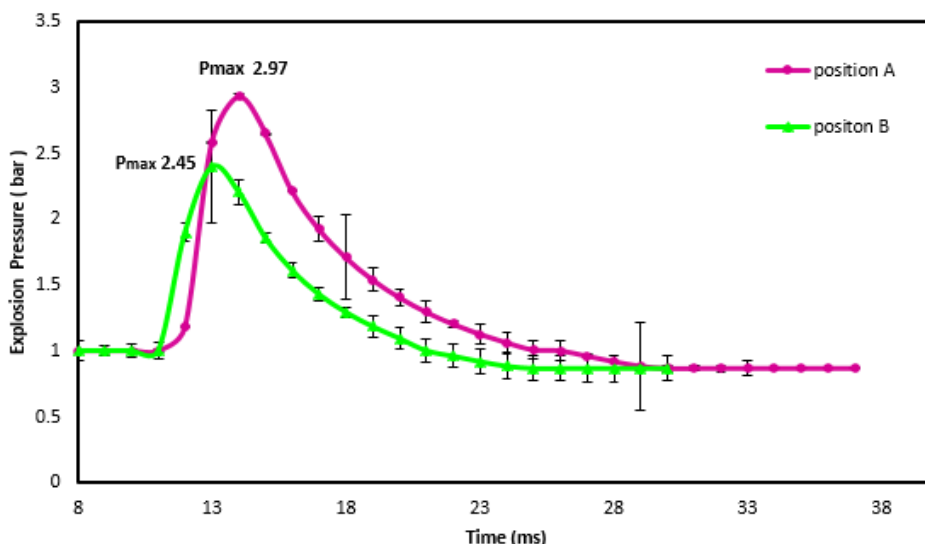


Figure 9- Effect of the position of 2 mm perforated plates of the ignition system on the combustion chamber pressure

شکل ۹- تأثیر موقعیت صفحات سوراخ‌دار ۲ میلی‌متری از سیستم جرقه بر فشار محفظه احتراق

در شکل ۱۰، تأثیر نسبت هم‌ارزی بر فاصله خاموشی نشان داده شده است. با در نظر گرفتن فاصله خاموشی به‌عنوان تابعی از نسبت هم‌ارزی نشان داده شده است که فاصله خاموشی در نسبت هم‌ارزی یک حداقل است و با افزایش نسبت هم‌ارزی، افزایش می‌یابد. طبق نتایج به‌دست آمده، تأثیر نسبت هم‌ارزی بر فاصله خاموشی شعله بیشتر وابسته به نوع سوخت مورد استفاده است و حضور صفحات سوراخ‌دار و موانع متخلخل تأثیر چندانی بر تأثیر نسبت هم‌ارزی بر فاصله خاموشی ندارد. مقدار فاصله خاموشی در نسبت هم‌ارزی یک با مقدار فاصله خاموشی محاسبه شده توسط آریف و همکاران [۳۳] در نسبت هم‌ارزی یک مطابقت خوبی دارد و حدود ۲ تا ۲/۵ میلی‌متر است.

1. Froude Number

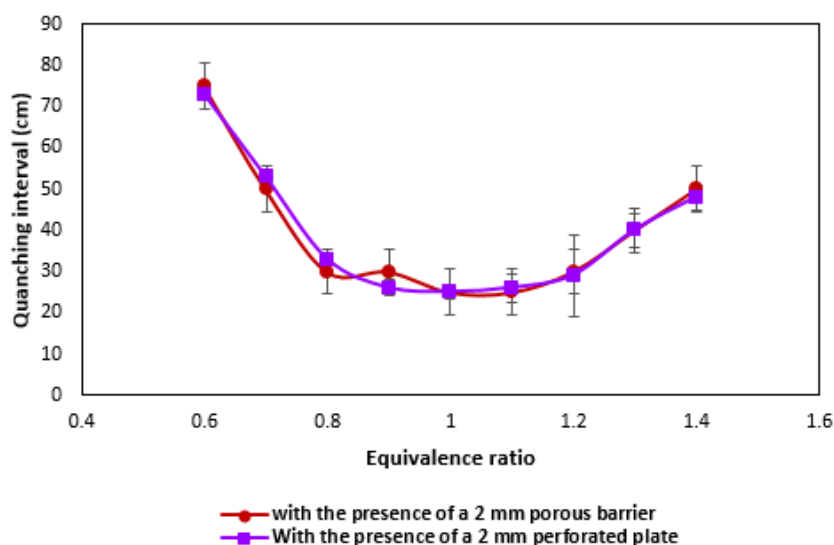


Figure 10- Investigation of the effect of equivalence ratio on flame extinction distance in the presence of porous barriers and 2 mm perforated plates

شکل ۱۰- بررسی تأثیر نسبت هم‌ارزی بر فاصله خاموشی شعله با حضور موانع متخلخل و صفحات سوراخ‌دار ۲ میلی‌متری

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق توانایی تجزیه و تحلیل تصویر جبهه شعله را برای تعیین فاصله خاموشی شعله نشان می‌دهد. مزیت اصلی این تکنیک در این واقعیت است که فاصله خاموشی به‌طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شود. علاوه بر این، امکان مشاهده رفتار جبهه شعله را در حین برخورد با مانع و نوع الگوی خاموشی (نوک‌به‌نوک و دیواره جانبی) فراهم می‌کند. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

- اختلال در جریان داخل محفظه بسته توسط صفحات سوراخ‌دار نقش اساسی در الگوی رشد جلوی شعله و سرعت نوک شعله دارد. درحقیقت، انسداد ایجادشده در مسیر جریان سرعت سوزش و شتاب شعله را افزایش می‌دهد.
- موقعیت موانع متخلخل و صفحات سوراخ‌دار ۲ میلی‌متری در فاصله خاموشی شعله تأثیرگذار است. هنگامی که صفحه سوراخ‌دار در فاصله ۱۶/۶ سانتی‌متری از سیستم جرقه قرار دارد، شعله پس از برخورد به مانع اول خاموش می‌شود، ولی در حالتی که مانع متخلخل در فاصله ۱۶/۶ سانتی‌متری از سیستم جرقه قرار دارد، شعله، پس از برخورد به مانع، از مانع رد می‌شود. بنابراین، وجود موانع متخلخل در یک محفظه بسته نسبت به صفحات سوراخ‌دار باعث افزایش فاصله خاموشی شعله می‌شود.
- هنگامی که مانع متخلخل ۲ میلی‌متری در فاصله ۲۵ سانتی‌متری از موقعیت جرقه دارد، شعله پس از برخورد به مانع اول خاموش شده و بیشینه سرعت نوک شعله به ۵ متر بر ثانیه رسیده است.
- طبق نتایج به‌دست‌آمده، حداقل فاصله خاموشی شعله مخلوط متان و هوا ۲/۵ میلی‌متر است که در نسبت هم‌ارزی یک اتفاق می‌افتد. با افزایش نسبت هم‌ارزی، فاصله خاموشی شعله از ۲/۵ میلی‌متر افزایش می‌یابد و تقریباً به ۵ میلی‌متر می‌رسد.
- هنگامی که شعله در محفظه بسته و در حضور یک مانع سوراخ‌دار تشکیل می‌شود، اگر شعله قبل از تشکیل شعله لاله‌گون خاموش شود، مدل انتشار شعله به‌صورت آرام/نوک‌به‌نوک^۱ است. در غیر این صورت، اگر شعله پس از تشکیل شعله لاله‌گون خاموش شود، مدل انتشار شعله قبل از برخورد به مانع سوراخ‌دار یا متخلخل، آرام/دیواره جانبی^۲ است.

1. Laminar/head on
2. Laminar/side wall

منابع

1. X. Cao, J. Ren, Y. Zhou, Q. Wang, X. Gao and M. Bi, "Suppression of methane/air explosion by ultrafine water mist containing sodium chloride additive," *J. Hazard Mater*, 285, 2015, pp. 311–318.
2. X. Chen, Y. Zhang, Q. Zhang, S. Ren and J. Wu, "Experimental investigation on micro-dynamic behavior of gas explosion suppression with SiO₂ fine powders," *Theory. Appl. Mech. Lett*, 1, 2011, pp. 58–61.
3. Y. Du, P. Zhang, Y. Zhou, S. Wu, J. Xu and G. Li, "Suppressions of gasoline-air mixture explosion by non-premixed nitrogen in a closed tunnel," *J. Loss Prev. Process. Ind*, 31, 2014, pp. 113–120.
4. P. Kosinski, "Numerical investigation of explosion suppression by inert particles in straight ducts," *J. Hazard Mater*, 154, 2013, pp. 981–991.
5. V. Babkin, A. Korzhavin and V. Bunev, "Propagation of premixed gaseous explosion flames in porous media," *Combust. Flame*, 87, 1991, pp. 182–190.
6. D. Trimis, F. Durst, "Combustion in a porous medium-advances and applications," *Combust. Sci. Technol*, 121, 1996, 153–168.
7. S. Mecke, D. Markus, C. Scholz, M. Thedens, H. Kim, F. Engelmann, A. Hilliger and U. Klausmeyer, "Examination of the flame transmission through porous structures," *Int. J. Transport Phenom*, 10, 2008, pp. 245–253.
8. A. Oliveira and M. Kaviany, "Nonequilibrium in the transport of heat and reactants in combustion in porous media," *Prog. Energy Combust. Sci*, 27, 2001, 523–545.
9. M. Dulger, E. Sher and F. Chemla, "Simulation of spark created turbulent flame development through numerical stochastic realizations," *Combustion Science and Technology*, 100, 1994, pp. 141–162.
10. J. H. Lu, O. Ezekoe, R. Greif and R. F. Sawyer, "Increased surface temperature effects on wall heat transfer during unsteady flame quenching," in: *Twenty-fourth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburg, pp. 1465–1472, 1992.
11. W. A. Daniel, "Flame quenching at the walls of an internal combustion engine," in: *Sixth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburg, pp. 886–894, 1957.
12. A. C. Alkidas, "Combustion-chamber crevices: the major source of engine-out hydrocarbon emissions under fully warmed conditions," *Progress in Energy and Combustion Science*, 25, 1999, pp. 253–273.
13. A. D. Goolsby and W. W. Haskell, "Flame-quenching distance measurements in CFR engine," *Combust. Flame*, 26, 1976, pp. 105–114.
14. C. L. Hackert, J. L. Ellzey and O. A. Ezekoye, "Effect of thermal boundary conditions on flame shape and quenching in ducts," *Combust. Flame*, 112, 1998, pp. 73–84.
15. O. Ezekoye, R. Geif and F. Sawyer, "Increased surface temperature effects on wall heat transfer during unsteady flame quenching," *Proc. Combust. Instit*, 24, 1992, pp. 1465–1472.
16. A. L. Berlad and A. E. Potter, "Prediction of the quenching effect of various surface geometries," *Proc. Combust. Instit*, 5, 1955, pp. 728–735.
17. C. R. Ferguson and J. C. Keck, "On laminar flame quenching and its application to spark ignition engines," *Combust. Flame*, 28, 1977, pp. 197–205.
18. A. E. Potter and A. L. Berlad, AL, A Thermal Equation for Flame Quenching. NASA TN 3398, 1955.
19. S. R. Vosen, R. Greif and C. K. Westbrook, "Unsteady heat transfer during laminar flame quenching," in: *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburg, pp. 75–83, 1984.
20. M. Enomoto, "Side-wall quenching of laminar premixed flame propagating along the single wall surface," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 29, The Combustion Institute, Pittsburg, in press, 2002.
21. D. J. Cleary and P. V. Farell, "Single-surface flame quenching distance, dependence on wall temperature, quenching geometry, and turbulence," *SAE Technical Paper*, 950162, 1994, pp. 49–61.
22. B. Boust, J. Sotton, S. A. Labuda and M. Bellenoue, "A thermal formulation for single-wall quenching of transient laminar flames," *Combust Flame*, 149, 2007, pp. 286–94.
23. M. Bellenoue, T. Kageyama, S. A. Labuda, J. Sotton, "Direct measurement of laminar flame quenching distance in a closed vessel," *Exp Therm Fluid Sci*, 27, 2003, pp. 323–31.
24. K. T. Kim, D. H. Lee and S. Kwon, "Effects of thermal and chemical surface-flame interaction on flame quenching," *Combust Flame*, 146, 2006, pp. 19–28.
25. Y. Fan., Y. Suzuki and N. Kasagi., "Quenching mechanism study of oscillating flame in micro channels using phase-locked OH-PLIF," *Proc. Combust. Inst.*, 33, No. 2, 2011, pp. 3267–3273.
26. M. Baigmohammadi., O. Roussel and C. M. Dion, "A Numerical Study of Lean Propane-Air Flame Acceleration at the Early Stages of Burning in Cold and Hot Isothermal Walled Small-Size Tubes," *Flow, Turbulence and Combustion*, 104, 2019, pp. 179–207.
27. M. Baigmohammadi., S. Tabejamaat and M. Faghani-Lamraski, "Experimental study on the effects of mixture flow rate, equivalence ratio, oxygen enhancement, and geometrical parameters on propaneair premixed flame dynamics in non-adiabatic meso-scale reactors," *Energy*, 121, 2017, pp. 657–675.
28. H. Kolahdoz, M.H. Keyhani, M. Nazari and R. Ebrahimi, "Laboratory study on the propagation of methane-air premixed flame in a closed chamber in the presence of a porous barrier," *Journal of Amirkabir University Mechanics*, 52, 2020, pp. 161-170.

29. H. Moradi, F. Sereshki, M. Ataei and M. Nazari, "Evaluation of the effect of moisture content of coal dust on prediction of coal dust explosion index," *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 48, 2020, pp. 45-67.
30. J. Lai and N. Chakraborty, "Effects of Lewis Number on Head on Quenching of Turbulent Premixed Flames: A Direct Numerical Simulation Analysis," *Flow Turbulence Combust.*, 96, 2016, pp. 279-308.
31. H. Xiao, Q. Wang, X. He, J. Sun and X. Shen, "Experimental study on the behaviors and shape changes of premixed hydrogen air flames propagating in horizontal duct," *international journal of hydrogen energy*, 36, 2011, pp. 6325- 6336.
32. K. Jin, Q. Duan, K.M. Liew, Z. Peng, L. Gong and J. Sun, "Experimental Study on a Comparison of Typical Premixed Combustible Gas-Air Flame Propagation in a Horizontal Rectangular Closed Duct," *Journal of Hazard and Material*, 327, 2017, pp. 116–126.
33. M. M. Ariff, J. S. Damazo, E. Kwon, W. L. Roberts and D. A. Lacoste, "Effect of propagation speed on the quenching of methane, propane and ethylene premixed flames between parallel flat plates," *Fuel*, 256, 2019, pp. 115-125.

English Abstract

Experimental study of flame quenching phenomenon of mixed methane and air in the presence of perforated plates and porous barriers in a closed chamber

Hadi Younesian¹, Mohsen Nazari^{*2} and Mohammad Mohsen Shahmardan³

1- Department of Mechanical Engineering, Energy Conversion, Shahrood University of Technology, Iran, H_younesian@yahoo.com

2- Department of Mechanical Engineering, Energy Conversion, Associate Professor Shahrood University of Technology, Iran, mnazari@shahroodut.ac.ir

3- Department of Mechanical Engineering, Energy Conversion, Professor Shahrood University of Technology, Iran, mmshahmardan@shahroodut.ac.ir

* Corresponding author

(Received: 2020.12.18, Received in revised form: 2021.04.30, Accepted: 2021.05.17)

Investigation the combustion pattern when the flame hits with obstacles is very important to increase safety in various industries. In this paper, the flame quenching behavior with the presence of porous barriers and perforated plates is investigated. In this study, a closed chamber with the presence of porous barriers and 2 mm perforated plates and a high-speed video camera were used to capture the flame propagation behavior process. All experiments were performed at atmospheric pressure. According to the recorded images, the flame quenches in two modes; side wall and head on, after hitting the obstacles. In this study, the effects of the position of obstacles from the ignition system on the flame quenching distance, flame quenching pattern, and flame propagation speed have been investigated. The position of the porous barriers and 2 mm perforated plates is effective in the flame quenching distance. When the perforated plate is 16.6 cm away from the ignition system, the flame quenches after hitting the first obstacle. However, when the porous barrier is located at a distance of 16.6 cm from the ignition system, the flame passes through the barrier after hitting the barrier. According to the results, the presence of porous barriers in a closed chamber compared to perforated plates increases the quenching distance and the speed of the flame tip. For example, with the presence of porous barriers relative to perforated plates, the flame quenching distance increases from 16.6 cm to 25 cm. Also, the flame tip speed has increased by about 128% from 2.5 to 5.7 m/s using porous obstacles.

Keywords: Flame quenching, quenching pattern, perforated plates, porous barriers, quenching distance, methane and air mixture.