

دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده مهندسی مکانیک

رساله دکتری

عنوان:

بررسی آزمایشگاهی اثر صفحات سوراخ دار و موانع متخلخل بر مشخصات
جبهه شعله پیش آمیخته متان - هوا در یک محفظه بسته

دانشجو:

هادی یونسیان

اساتید راهنما:

دکتر محمد محسن شاه مردان

دکتر محسن نظری

بهمن ۱۴۰۰

تقدیم به مقدس ترین واژه ها در لغت نامه قلم

پدرم، کوهی استوار در تمام طول زندگی

مادرم، سنگ صوری که الفبای زندگی به من آموخت

همسرم، که در سایه همیاری و بهی اوبه این منظور نائل شدم.

تشکر و قدردانی:

به مصداق (من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق) بسی شایسته است از اساتید فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر شاهرمدان و جناب آقای دکتر نظری که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی‌های کارساز و سازنده بارور ساختند، تقدیر و تشکر نمایم. از خداوند منان می‌خواهم همه کسانی را که حتی ذره‌ای در انجام این امر مرا یاری نمودند، در سایه لطف و محبت بی‌کرانشان، سلامت، شادکام و موفق بدارد.

مقامت زعرش برترباد، همیشه توسن اندیشه‌ات مظفرباد

به نکته‌های دلاویز و گفته‌های بلند صحیفه‌های سخن از تو علم پرور باد

تعهد نامه

اینجانب هادی یونسیان دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی آزمایشگاهی تأثیر صفحات سوراخ دار و موانع متخلخل بر مشخصات جبهه شعله پیش آمیخته متان - هوا در یک محفظه بسته تحت راهنمایی جنابان دکتر محمد محسن شاه مردان و دکتر محسن نظری متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده است در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده یا بافت‌های آن استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ و امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود

مقالات مستخرج از رساله

❖ مقالات پذیرفته شده

- 1- Yonesian H., Nazari M. and Shahmardan MM., (2022), **Visualization of Flame Propagation and Quenching of Methane/Air Mixture in a cubic enclosure with Perforated Plates: Experimental Study**, Journal of Combustion Science and Technology.
- 2- Yonesian H., Nazari M. and Shahmardan MM., (2019), **Laboratory study of the effect of porous material on flame structure**, 4th national Conference on Mechanical and Aerospace Engineering.
- ۳- یونسیان ه، نظری م و شاهمردان م م، (۱۴۰۰)، بررسی آزمایشگاهی پدیده خاموشی شعله مخلوط متان و هوا با حضور صفحات سوراخ دار و موانع متخلخل در یک محفظه بسته، نشریه علمی -پژوهشی سوخت و احتراق، سال چهاردهم، شماره دوم. doi= 10.22034/JFNC.2021.262501.1255
- ۴- یونسیان ه، نظری م و شاهمردان م م، (۱۳۹۹)، بررسی پدیده خاموشی شعله و بهینه سازی احتراق در موتورهای احتراق داخلی با حضور موانع، اولین کنفرانس پیشرفت‌های اخیر و روندهای آینده در صنعت خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- ۵- یونسیان ه، نظری م و شاهمردان م م، (۱۳۹۸)، بررسی دینامیک انتشار شعله پیش آمیخته با حضور ماده متخلخل (مقاله مروری)، چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مکانیک و هوا و فضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.

چکیده

امروزه ایمنی و جلوگیری از احتراق در فرآیند تولید، انتقال و بهره برداری از مواد قابل اشتعال بسیار حائز اهمیت است. رفتار شعله در یک محیط بسته و محدود دارای پیچیدگی بیش‌تری نسبت به احتراق در محیط باز است و فرآیند احتراق توانایی این را دارد که از حالت آرام به حالت آشفته و در نهایت به انفجار تبدیل شود که این پدیده مخرب و خطر آفرین است. فرآیند انتشار جبهه شعله در داخل مخلوط گازی با توجه به نوع جریان و ماهیت شیمیایی سوخت و شرایط مرزی حاکم متفاوت بوده که موجب ناپایداری‌های گوناگونی در جبهه شعله و تغییر در سرعت انتشار شعله می‌شود. حضور موانع در مسیر جریان موجب ایجاد گردابه‌ها و به هم ریختگی و چین و چروک شدن سطح شعله و در نهایت موجب تقسیم جبهه شعله به جبهه‌های کوچک‌تر می‌شوند. این موضوع باعث افزایش مساحت سطح شعله و به دنبال آن افزایش سرعت شعله می‌گردد. در این رساله اثر موانعی از قبیل صفحات سوراخ دار و موانع متخلخل بر انتشار جبهه شعله پیش آمیخته متان و هوا در یک کانال بسته مورد مطالعه قرار گرفته است. به همین منظور از یک دستگاه احتراق حجم ثابت برای انجام آزمون احتراق و بررسی پارامترهای احتراقی از قبیل روند انتشار شعله، فشار محفظه احتراق و سرعت نوک شعله استفاده شد و در نهایت تأثیر تعداد موانع، ضخامت موانع، قطر منافذ موانع، تغییر نسبت هم‌ارزی، فاصله بین موانع و فاصله از منبع احتراق بر پارامترهای احتراقی فوق‌الذکر اندازه‌گیری و ثبت شد. طبق نتایج به دست آمده آشفته‌گی و سرعت شعله در محفظه بسته با افزایش تعداد موانع افزایش یافته است به گونه‌ای که در حالت حضور یک مانع، حداکثر سرعت انتشار ۸/۵ متر بر ثانیه است در حالی که با افزودن مانع با قطر و ضخامت مشابه به ۱۲/۵ متر بر ثانیه رسیده است. همچنین با کاهش اندازه منافذ صفحات سوراخ دار به ۲ میلی‌متر، به دلیل کاهش انرژی حرارتی داخل محفظه واز بین رفتن رادیکال‌ها در مجاورت دیواره، شعله پس از برخورد به اولین مانع سوراخ دار خاموش می‌شود. همچنین علاوه بر قطر موانع سوراخ دار، ضخامت موانع نیز در خاموشی شعله مؤثر است به گونه‌ای که در شرایط مشابه شعله پس از برخورد به مانع سوراخ دار با اندازه منافذ ۳ میلی‌متری و ضخامت ۴ میلی‌متر خاموش شده است در صورتی که

پس از برخورد با همان مانع با ضخامت ۲ میلی متر عبور کرده است. در خاموشی شعله دو الگوی خاموشی Head-on و Sidewall قابل مشاهده است. فاصله موانع از جرقه در تبدیل این الگوهای خاموشی به یکدیگر مؤثر است به گونه ای که با افزایش فاصله مانع از جرقه، الگوی خاموشی از Head on به Sidewall تبدیل می شود. به جهت بررسی شباهت عملکرد مانع متخلخل با مانع سوراخ دار، یک مانع متخلخل ۲ میلی متری با ابعاد، جنس، ضخامت و تخلخل مشابه طراحی و ساخته شد. طبق نتایج آزمایش ها، مانع متخلخل همانند صفحه سوراخ دار ۲ میلی متری در موقعیت های مختلفی از سیستم جرقه باعث خاموشی شعله شده است. بنابراین محیط متخلخل به دلیل افزایش چگالی منافذ و مساحت سطح داخلی موثر، برای انتقال حرارت همرفتی بین محیط متخلخل و شعله، عملکرد خوبی در خاموشی شعله دارند. لذا در صنایع مختلفی از قبیل معادن، پتروشیمی، نفت و گاز که در معرض خطر احتراق و انفجار هستند قابل استفاده می باشد.

کلمات کلیدی: محفظه بسته احتراق، مخلوط متان و هوا، صفحات سوراخ دار، مانع متخلخل، خاموشی شعله،

الگوی خاموشی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه و کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- سوال‌های اصلی تحقیق
۳	۳-۱- ضرورت انجام تحقیق
۴	۴-۱- اهداف رساله
۴	۵-۱- نوآوری رساله
۶	۶-۱- کاربردهای رساله
۷	۷-۱- مراحل انجام رساله
۸	۸-۱- ساختار رساله
۹	فصل دوم: تئوری احتراق
۱۰	۱-۲- مقدمه
۱۰	۲-۲- انواع سناریو احتراق
۱۱	۱-۲-۲- سوختن
۱۱	۲-۲-۲- احتراق ناگهانی
۱۲	۳-۲-۲- انفجار
۱۵	۴-۲-۲- انفجار شدید
۱۸	۳-۲- انواع شعله
۱۹	۱-۳-۲- شعله نفوذی
۱۹	۲-۳-۲- شعله پیش آمیخته
۲۰	۴-۲- شعله آرام
۲۰	۱-۴-۲- ساختار شعله آرام
۲۲	۲-۴-۲- سرعت شعله آرام
۲۹	۳-۴-۲- روش‌های تجربی تعیین سرعت شعله آرام
۳۲	۵-۲- شعله آشفته
۳۵	۶-۲- ناپایداری شعله
۳۶	۷-۲- الگوهای احتراق در انتشار شعله
۳۷	۸-۲- خاموشی شعله
۴۰	۹-۲- جمع‌بندی
۴۱	فصل سوم: سابقه علمی موضوع
۴۲	۱-۳- مقدمه
۴۴	۲-۳- مطالعات انجام شده در زمینه بررسی انفجارهای گازی
۴۴	۱-۲-۳- دان رانکین و ساویر
۴۶	۲-۲-۳- بلنیو و همکاران

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۴۷	۳-۲-۳- کورزاوین و همکاران
۴۷	۳-۲-۴- بوست و همکاران
۴۸	۳-۲-۵- تنگ و همکاران
۴۹	۳-۲-۶- کیائو و همکاران
۵۰	۳-۲-۷- شن و همکاران
۵۱	۳-۲-۸- یانگ و همکاران
۵۲	۳-۲-۹- گائو و همکاران
۵۴	۳-۲-۱۰- پالکا و همکاران
۵۵	۳-۲-۱۱- هاشمی و همکاران
۵۵	۳-۲-۱۲- کیائو و همکاران
۵۸	۳-۲-۱۳- چن و همکاران
۵۹	۳-۲-۱۴- سان و شن
۶۰	۳-۲-۱۵- یو و همکاران
۶۱	۳-۲-۱۶- چن و همکاران
۶۳	۳-۲-۱۷- جین و همکاران
۶۵	۳-۲-۱۸- لی و همکاران
۶۶	۳-۲-۱۹- لیو و همکاران
۶۸	۳-۲-۲۰- لو و همکاران
۶۹	۳-۲-۲۱- لیو و همکاران
۷۲	۳-۲-۲۲- کلاهدوز و همکاران
۷۳	۳-۲-۲۳- آریف و همکاران
۷۵	۳-۲-۲۴- ونگ و همکاران
۷۶	۳-۲-۲۵- جین و همکاران
۷۹	۳-۲-۲۶- وی و همکاران
۸۲	۳-۳- مقایسه بین مطالعات انجام شده و هدف رساله
۸۲	۳-۴- جمع‌بندی
۸۳	فصل چهارم: آماده‌سازی مدل آزمایشگاهی جهت انجام آزمون احتراق
۸۴	۴-۱- مقدمه
۸۵	۴-۲- مدل آزمایشگاهی
۸۷	۴-۲-۱- محفظه احتراق
۸۷	۴-۲-۲- سیستم جرقه زنی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۹۱	۳-۲-۴- سیستم سوخت رسانی
۹۲	۴-۲-۴- حسگرهای اندازه گیری فشار
۹۴	۵-۲-۴- سیستم تصویربرداری
۹۴	۶-۲-۴- واحد کنترل الکترونیکی
۹۶	۷-۲-۴- مانع متخلخل و صفحات سوراخ دار
۹۸	۳-۴- تحلیل خطاها و فاصله اطمینان
۹۹	۴-۴- مراحل اجرای احتراق مخلوط متان و هوا در حضور موانع
۹۹	۱-۴-۴- ایجاد خلأ در محفظه احتراق
۱۰۰	۲-۴-۴- تهیه مخلوط سوخت و هوا
۱۰۲	۵-۴- جمع بندی
۱۰۳	فصل پنجم: تحلیل نتایج حاصل از آزمون احتراق
۱۰۴	۱-۵- مقدمه
۱۰۵	۲-۵- ارزیابی احتراق مخلوط گاز متان و هوا در یک محفظه بسته
۱۰۵	۳-۵- ارزیابی احتراق مخلوط گاز متان و هوا در یک محفظه بسته بدون حضور موانع
۱۰۹	۴-۵- ارزیابی احتراق مخلوط گاز متان و هوا در یک محفظه بسته با حضور صفحات سوراخ دار
۱۱۰	۱-۴-۵- بررسی تأثیر تعداد موانع بر رفتار شعله
۱۱۴	۲-۴-۵- بررسی تأثیر قطر موانع بر رفتار شعله
۱۲۲	۳-۴-۵- بررسی تأثیر ضخامت موانع بر رفتار شعله
۱۲۵	۴-۴-۵- بررسی تغییر نسبت هم آروزی بر رفتار شعله
۱۲۶	۵-۴-۵- بررسی تغییر فشار اولیه مخلوط
۱۲۷	۶-۴-۵- بررسی تأثیر موقعیت قرارگیری موانع از سیستم جرقه بر رفتار شعله
۱۳۲	۷-۴-۵- بررسی اثر فاصله بین موانع بر رفتار شعله
۱۳۶	۵-۵- بررسی شباهت عملکرد موانع متخلخل با صفحات سوراخ دار
۱۳۹	۶-۵- آنالیز ابعادی
۱۴۲	۱-۶-۵- تشابه سینماتیکی
۱۴۳	۷-۵- جمع بندی
۱۴۵	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۴۶	۱-۶- نتیجه گیری
۱۴۸	۲-۶- پیشنهادات
۱۴۹	پیوست
۱۵۷	مراجع

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۷	شکل ۱-۱: مراحل انجام رساله
۸	شکل ۲-۱: ساختار رساله
۱۰	شکل ۱-۲: انواع انفجار در فعالیت‌های صنعتی
۱۲	شکل ۲-۲: احتراق ناگهانی گرد آلومینیوم
۱۲	شکل ۳-۲: نمونه‌ای از انفجار در یک محیط بسته
۱۴	شکل ۴-۲: نمودار فشار در واحد زمان انفجار گاز در یک محیط بسته
۱۶	شکل ۵-۲: مدل ZND
۱۷	شکل ۶-۲: نمایش خطر انفجار ثانویه و شتاب شعله
۱۸	شکل ۷-۲: مراحل انفجار شدید یک مخلوط انفجاری همراه با شتاب شعله در معدن بروستون
۲۱	شکل ۸-۲: طرح ساده از ساختار جبهه شعله آرام
۲۵	شکل ۹-۲: نمودار تغییرات سرعت شعله با نسبت هم ارزی سوخت متان و هوا
۲۶	شکل ۱۰-۲: نمودار تغییرات ضخامت شعله با نسبت هم ارزی سوخت متان
۲۸	شکل ۱۱-۲: فرآیند انتشار شعله مخلوط متان و هوا تحت فشارهای مختلف اولیه
۳۴	شکل ۱۲-۲: نمودار بورگی برای الگوی های احتراق
۳۶	شکل ۱۳-۲: شماتیک الگوهای امکان پذیر برای انتشار شعله پیش آمیخته در یک محفظه
۳۷	شکل ۱۴-۲: انتشار شعله در پشت صفحات سوراخ دار با اندازه سوراخ های مختلف در فشار اولیه ۵ بار
۳۹	شکل ۱۵-۲: شبیه سازی مدل خاموشی Head On
۴۰	شکل ۱۶-۲: شبیه سازی مدل خاموشی SideWall
۴۳	شکل ۱-۳: انتشار شعله لاله‌گون متان و هوا در یک محفظه بسته مستطیلی
۴۴	شکل ۲-۳: نتایج حاصل از عکس برداری و تغییرات فشار داخل محفظه بسته برای طول های $L = 30, 60, 90 \text{ mm}$ و مخلوط استوکیومتری متان-هوا
۴۶	شکل ۳-۳: انواع فاصله خاموشی در حضور موانع با جنس مختلف
۴۸	شکل ۴-۳: انواع فاصله خاموشی ثبت شده در فشار و نسبت هم ارزی مختلف
۴۹	شکل ۵-۳: تصویر جبهه شعله هیدروژن-هوا با نسبت های هم ارزی متفاوت
۵۰	شکل ۶-۳: (a) تصویر جبهه شعله هیدروژن-هوا با $\phi = 3.03$ (b) شماتیک تشکیل گل لاله کلاسیک
۵۱	شکل ۷-۳: تصاویر شعله هیدروژن-هوا برای $\phi = 1.47$
۵۱	شکل ۸-۳: تصاویر شعله هیدروژن-هوا برای $\phi = 5.07$
۵۳	شکل ۹-۳: نمودار افت فشار و سرعت جریان گاز برای مواد مختلف فوم
۵۳	شکل ۱۰-۳: نمودار آلاینده‌گی CO با سرعت جریان برای مواد مختلف
۵۵	شکل ۱۱-۳: شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۵۶	شکل ۳-۱۲: تصاویر جبهه شعله برای موقعیت ۱ جرعه
۵۶	شکل ۳-۱۳: تصاویر جبهه شعله برای موقعیت ۲ جرعه
۵۶	شکل ۳-۱۴: تصاویر جبهه شعله برای موقعیت ۳ جرعه
۵۷	شکل ۳-۱۵: نمودار مکان گل لاله و سرعت شعله نسبت به زمان برای موقعیت‌های متفاوت جرعه
۵۸	شکل ۳-۱۶: تصویر رشد جبهه شعله به طور آزمایشگاهی و شبیه سازی به همراه خطوط جریان
۵۹	شکل ۳-۱۷: تصویر شعله برای مخلوط هیدروژن-هوا
۵۹	شکل ۳-۱۸: تصویر شعله برای مخلوط پروپان-هوا
۶۱	شکل ۳-۱۹: تصاویر شعله برای ابعاد A، B و C با نسبت‌های مختلف هیدروژن در مخلوط
۶۲	شکل ۳-۲۰: تغییرات شکل شعله برای مخلوط گاز طبیعی-هوا برای نسبت‌های هم ارزی مختلف
۶۲	شکل ۳-۲۱: تغییرات شکل شعله برای مخلوط متان-هوا برای نسبت‌های هم ارزی مختلف
۶۳	شکل ۳-۲۲: تغییرات شکل شعله برای مخلوط استیلن-هوا برای نسبت‌های هم ارزی مختلف
۶۴	شکل ۳-۲۳: توری‌های سیمی مورد استفاده در تحقیق
۶۴	شکل ۳-۲۴: (الف) فشار به عنوان تابعی از زمان در محفظه بسته هنگام انتشار شعله از طریق توری سیمی، (ب) مقایسه سرعت نوک شعله بدون توری سیمی و با حضور تور سیمی با مش‌های مختلف
۶۵	شکل ۳-۲۵: (تصویر a) انتشار شعله و تصویر (b) تغییرات سرعت شعله در موقعیت‌های مختلف
۶۶	شکل ۳-۲۶: نمودار تغییرات متوسط سرعت شعله در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف
۶۷	شکل ۳-۲۷: شماتیک موانع مورد استفاده در آزمایشات
۶۸	شکل ۳-۲۸: نمودار فشار احتراق هیدروژن هوا بدون صفحه و $BR = 0.94$ صفحه سوراخدار
۶۹	شکل ۳-۲۹: شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی
۷۰	شکل ۳-۳۰: انتشار شعله براساس فاصله‌های مختلف بین جرعه و صفحه سوراخدار
۷۱	شکل ۳-۳۱: پروفیل نوک شعله و سرعت موج شوک در شرایط مختلف
۷۲	شکل ۳-۳۲: موقعیت جلو شعله و میزان سرعت انتشار شعله در زمان‌های مختلف
۷۳	شکل ۳-۳۳: (a) موقعیت جلو شعله (ب) تغییرات فشار در برابر زمان
۷۳	شکل ۳-۳۴: تصاویر جلوی شعله با موانع در فاصله ۱۵ سانتی‌متر از سوپاپ
۷۴	شکل ۳-۳۵: (الف) تصویر سلول احتراق با حجم ثابت، (ب) شماتیک مربوطه، و (ج) عبور شعله از بین دو مانع در محفظه
۷۴	شکل ۳-۳۶: تصاویر شیلینر از شعله‌های متان-هوا استوکیومتری
۷۵	شکل ۳-۳۷: رابطه فاصله خاموشی با (الف) سرعت شعله برای سوخت‌های مورد استفاده (ب) نسبت هم ارزی برای سوخت‌های مورد استفاده
۷۶	شکل ۳-۳۸: تصویر شعله در شعاع‌های مختلف شعله تحت شدت‌های مختلف آشفته‌گی
۷۷	شکل ۳-۳۹: مش‌های مورد استفاده در آزمایش
۷۸	شکل ۳-۴۰: تصاویر انتشار شعله در حضور توری‌های سیمی با مش‌های مختلف

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۷۸	شکل ۳-۴۱: حداکثر فشار در حضور توری های سیمی با مش های مختلف
۸۰	شکل ۳-۴۲: تغییرات سرعت شعله در حضور صفحه سوراخ دار با اندازه منافذ مختلف
۸۵	شکل ۴-۱: روند اجرای مدل آزمایشگاهی جهت شروع آزمون احتراق
۸۵	شکل ۴-۲: الف) نمای واقعی مدل آزمایشگاهی، ب) نمای شماتیکی
۸۷	شکل ۴-۳: محفظه مورد استفاده جهت اجرای آزمون احتراق
۸۸	شکل ۴-۴: ساختمان داخلی کوئل
۹۰	شکل ۴-۵: ساختمان داخلی شمع جرقه زن
۹۰	شکل ۴-۶: نمونه ای از شمع و کوئل مورد استفاده در آزمون احتراق
۹۱	شکل ۴-۷: الف) افشانه پاشش گاز متان؛ ب) شش سوراخ موجود در افشانه گاز متان
۹۲	شکل ۴-۸: حالت های پاشش گاز متان از افشانه شش سوراخه
۹۳	شکل ۴-۹: حسگر اندازه گیری فشار احتراق و دستگاه ثبت کننده اطلاعات
۹۴	شکل ۴-۱۰: دوربین سرعت بالا PCO
۹۵	شکل ۴-۱۱: دستگاه کنترل فرمان شروع جرقه و پاشش گاز متان
۹۶	شکل ۴-۱۲: شکل نمادینی از نحوه ارتباط واحد کنترل الکترونیکی با اجزای محفظه احتراق
۹۷	شکل ۴-۱۳: نمای شماتیکی و نمای واقعی صفحات سوراخ دار و مانع متخلخل
۹۹	شکل ۴-۱۴: مراحل آماده سازی و انجام آزمون احتراق
۱۰۰	شکل ۴-۱۵: استخراج تابع زمان- فشار جزئی برای سوخت متان
۱۰۶	شکل ۵-۱: روند انتشار شعله مخلوط متان و هوا در یک محفظه بسته بدون حضور موانع
۱۰۷	شکل ۵-۲: موقعیت و سرعت نوک شعله بر حسب زمان
۱۰۹	شکل ۵-۳: نمودار تغییرات فشار داخل محفظه بر حسب زمان
۱۱۰	شکل ۵-۴: حالت های آزمایش شده با حضور موانع
۱۱۰	شکل ۵-۵: نحوه قرار گیری موانع در محفظه بسته
۱۱۱	شکل ۵-۶: روند انتشار شعله مخلوط متان و هوا در یک محفظه بسته؛ الف) با حضور یک مانع، ب) با حضور دو مانع مشابه
۱۱۲	شکل ۵-۷: نمودار تغییرات فشار داخل محفظه بر حسب زمان با تکرار موانع
۱۱۳	شکل ۵-۸: نمودار تغییرات سرعت نوک شعله؛ الف) با حضور یک مانع ب) با حضور دو مانع یکسان
۱۱۵	شکل ۵-۹: روند انتشار شعله مخلوط متان- هوا در یک محفظه بسته با حضور صفحات سوراخ دار با قطر مختلف؛ الف) ۵ میلی متری، ب) ۴ میلی متری
۱۱۶	ادامه شکل ۵-۹: روند انتشار شعله مخلوط متان- هوا در یک محفظه بسته با حضور صفحات سوراخ دار با قطر مختلف؛ ج) ۳ میلی متری، د) ۲ میلی متری

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۱۱۹	شکل ۵-۱۰: نمودار تغییرات فشار داخل محفظه احتراق بر حسب زمان با حضور صفحات سوراخ دار با قطرهای مختلف
۱۲۱	شکل ۵-۱۱: نمودار تغییرات سرعت نوک شعله با حضور صفحات سوراخ دار با قطرهای مختلف
۱۲۳	شکل ۵-۱۲: روند انتشار شعله مخلوط متان- هوا در یک محفظه بسته با حضور صفحه سوراخ دار ۳ میلی‌متری با ضخامت مختلف؛ الف) ۲ میلی‌متری، ب) ۴ میلی‌متری
۱۲۴	شکل ۵-۱۳: نمودار تغییرات فشار با حضور صفحه سوراخ دار ۳ میلی‌متری با ضخامت مختلف ۲ و ۴ میلی‌متری
۱۲۴	شکل ۵-۱۴: نمودار تغییرات سرعت با حضور صفحه سوراخ دار ۳ میلی‌متری با ضخامت مختلف ۲ و ۴ میلی‌متری
۱۲۵	شکل ۵-۱۵: روند انتشار شعله مخلوط متان- هوا در یک محفظه بسته با حضور صفحه سوراخ دار ۴ میلی‌متری در نسبت هم ارزی مختلف
۱۲۶	شکل ۵-۱۶: نمودار تغییرات سرعت با حضور صفحه سوراخ دار ۴ میلی‌متری در فاصله ۱۶/۶ سانتی‌متری از سیستم جرقه در نسبت‌های هم ارزی مختلف
۱۲۷	شکل ۵-۱۷: روند تغییر فشار با تغییر فشار اولیه مخلوط (۱ بار، ۱/۵ بار، ۲ بار)
۱۲۸	شکل ۵-۱۸: روند انتشار شعله مخلوط متان- هوا در یک محفظه بسته با حضور صفحه سوراخ دار ۴ میلی‌متری در فاصله؛ الف) ۱۶/۶ سانتی‌متری از سیستم جرقه، ب) ۲۵ سانتی‌متری از سیستم جرقه
۱۲۹	ادامه شکل ۵-۱۸: روند انتشار شعله مخلوط متان- هوا در یک محفظه بسته با حضور صفحه سوراخ دار ۴ میلی‌متری در فاصله؛ ج) ۳۳/۳ سانتی‌متری از سیستم جرقه
۱۳۱	شکل ۵-۱۹: نمودار تغییرات فشار با حضور صفحه سوراخ دار ۴ میلی‌متری در سه فاصله مختلف از منبع احتراق
۱۳۲	شکل ۵-۲۰: نمودار تغییرات سرعت با حضور صفحه سوراخ دار ۴ میلی‌متری در فاصله‌های مختلف از سیستم جرقه؛ الف) ۱۶/۶ سانتی‌متری، ب) ۲۵ سانتی‌متری، ج) ۳۳/۳ سانتی‌متری
۱۳۴	شکل ۵-۲۱: روند انتشار شعله مخلوط متان- هوا در یک محفظه بسته با حضور مانع اول در فاصله ۲۵ سانتی‌متری از سیستم جرقه، الف) مانع دوم در فاصله ۲۷/۵ سانتی‌متری از سیستم جرقه ب) مانع دوم در فاصله ۳۳/۳ سانتی‌متری از سیستم جرقه
۱۳۵	شکل ۵-۲۲: نمودار تغییرات فشار با حضور صفحه سوراخ دار ۳ میلی‌متری با تغییر فاصله بین موانع؛ الف) فاصله بین صفحات ۲/۵ سانتی‌متر، ب) فاصله بین صفحات ۸/۳ سانتی‌متر
۱۳۶	شکل ۵-۲۳: نمودار تغییرات سرعت با حضور صفحه سوراخ دار ۴ میلی‌متری با تغییر فاصله بین موانع؛ الف) فاصله بین صفحات ۲/۵ سانتی‌متر، ب) فاصله بین صفحات ۸/۳ سانتی‌متر
۱۳۷	شکل ۵-۲۴: روند انتشار شعله مخلوط متان- هوا در یک محفظه بسته ؛ الف) ۱۶/۶ سانتی‌متری از سیستم جرقه، ب) ۲۵ سانتی‌متری از سیستم جرقه.
۱۳۸	ادامه شکل ۵-۲۴: روند انتشار شعله مخلوط متان- هوا در یک محفظه بسته ؛ ج) ۳۳/۳ سانتی‌متری از سیستم جرقه

فهرست جدول‌ها

عنوان	شماره صفحه
جدول ۱-۲: حداقل انرژی احتراق برای گازهای موجود در محیط بسته در فشار ۱ اتمسفر	۱۵
جدول ۱-۳: پارامترهای مورد مطالعه محققان در زمینه بررسی احتراق در محفظه بسته	۸۱
جدول ۱-۴: مشخصات صفحات سوراخ دار مورد استفاده در محفظه احتراق	۹۷
جدول ۲-۴: فشارهای جزئی سوخت متان و هوا در فشار اولیه و نسبت هم ارزی ۱	۱۰۲
جدول ۱-۵: حالت‌های مختلف آزمایش شده در تحقیق	۱۰۵
جدول ۲-۵: نتایج اثر فشار اولیه مخلوط بر احتراق مخلوط گاز متان و هوا	۱۲۶
جدول ۳-۵: حالت‌های آزمایش شده جهت بررسی فاصله بین موانع	۱۳۳
جدول ۴-۵: ابعاد کمیت‌های مورد استفاده در رساله	۱۴۰

فهرست علائم و نشانه‌ها

علائم اختصاری

عنوان

A / F	نسبت هوا به سوخت
F / A	نسبت سوخت به هوا
ISE	موتور احتراق داخلی
k_e	ثابت تعادل شیمیایی
n	تعداد مول‌ها
P	فشار
Q	گرما
Q_{HV}	ارزش حرارتی سوخت
T	دما
V	حجم
c_p	گرمای ویژه در فشار ثابت
c_v	گرمای ویژه در حجم ثابت
e	انرژی داخلی
h	آنتالپی
k	ثابت واکنش سینتیک
m	جرم
ρ	چگالی
x	کسر مولی اجزاء
Φ	نسبت هم‌ارزی
Fr	عدد فرود
SD	انحراف استاندارد
SE	خطای استاندارد
CI	فاصله اطمینان

فصل اول

مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

به طور گسترده در زندگی روزمره و صنایع مختلف احتراق گازهایی مانند هیدروژن، متان، پروپان و غیره کاربرد فراوان دارد و به طور خاص در مهندسی پتروشیمی، برق، متالوژی، معدن، حمل و نقل و نفت و گازها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فرآیندهای تولید، انتقال، ذخیره‌سازی و مصرف، به دلیل تمایل بسیار زیاد به اشتعال و انفجار، مواد بسیار خطرناکی هستند. مخلوط قابل اشتعال می‌تواند در اثر نشت تصادفی گاز به داخل هوا یا نفوذ هوا به داخل مخزن و لوله حاوی گاز تشکیل شود. این مخلوط قابل اشتعال که اصطلاحاً پیش اختلاط نامیده می‌شود بی‌نهایت خطرناک است و ریسک انفجاری بالایی دارد. در صورتی که یک منبع جرقه ایجاد شود و واکنش مخلوط آغاز گردد احتراق شکل گرفته و در شرایط مناسب احتراق به انفجار تبدیل می‌شود. از مهم‌ترین کاربردهای محیط‌های متخلخل و صفحات سوراخ‌دار در طراحی و تولید سیستم‌های مختلف به منظور جلوگیری از احتراق و افزایش ایمنی بخش‌ها و صنایع مختلف می‌باشد. همچنین می‌توان برای جلوگیری از ایجاد انفجار در معادن زغال‌سنگ و تونل‌ها، ایمنی در زمان بهره‌برداری و ذخیره‌سازی سوخت‌های گازی مانند هیدروژن و متان و همچنین درک عمیق‌تری از برخورد جبهه شعله و موج فشار و احتراق در بخش‌های مختلف مانند طراحی موتورهای احتراق داخلی و غیره اشاره کرد. از این رو مطالعه رفتار شعله در شرایط مختلف دارای اهمیت بسیار ویژه‌ای می‌باشد.

۱-۲- سؤال‌های اصلی تحقیق

- به طور کلی مهم‌ترین سؤال‌های این تحقیق را می‌توان به طور خلاصه به صورت زیر بیان کرد:
- چه روش‌های آزمایشگاهی برای بررسی خطر انفجار گازها از قبیل مخلوط گاز متان و هوا وجود دارد؟
 - آیا با استفاده از موانع از قبیل مواد متخلخل و صفحات سوراخ دار می‌توان احتراق گاز متان را کنترل کرد و نهایت به خاموشی شعله دست یافت؟
 - آیا موقعیت قرارگیری موانع و تعداد آن‌ها تأثیری بر انتشار شعله خواهد گذاشت؟
 - آیا می‌توان برای خاموشی شعله الگویی در نظر گرفت و عوامل موثر بر آن را شناسایی و بررسی نمود؟
 - آیا می‌توان این نتایج را براساس داده‌های موجود در مطالعات قبلی مقایسه و اعتبارسنجی کرد؟

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

در صنایع پتروشیمی، نفت، گاز و معادن و سایر محیط‌های کاری عوامل خطرزای متفاوتی وجود دارد. از این رو تحقیق و توسعه ایمنی در این صنایع به منظور جلوگیری از انفجار گاز متان امری حیاتی و مهم می‌باشد و می‌بایستی با استفاده از دانش فنی و سایر امکانات موجود خطرات را به حداقل رسانید.

به طور کلی فرآیند انفجار گاز متان به دلیل تأثیر مستقیم بر حفظ ایمنی محیط کار، باید به دقت مورد ارزیابی قرار گیرد؛ بنابراین ارزیابی خطر انفجار گاز متان امری اساسی و بنیادی در صنایعی که با آن سروکار دارند به شمار می‌آید. با وجود مطالعات گسترده در این حوزه، روشی برای کنترل و خاموشی شعله گاز متان ارائه نشده است؛ لذا با توجه به تمامی مطالب مذکور، هم از منظر اهمیت برای کشور و هم از لحاظ دیدی به وسعت فراگیری این موضوع در سراسر جهان، مطالعه در زمینه بررسی خطر انفجار مخلوط گاز متان و هوا، امری ضروری به نظر می‌رسد.

۱-۴- اهداف رساله

مطابق مطالب بیان شده، احتراق مخلوط پیش آمیخته متان و هوا در یک محفظه بسته با حضور موانع متخلخل و صفحات سوراخدار مختلف به جهت بررسی فشار حاصل از احتراق و انتشار شعله نیاز به مطالعات عمیق تری دارد، لذا هدف از انجام این پژوهش بررسی آزمایشگاهی تأثیر موانع متخلخل و صفحات سوراخدار بر مکانیزم انتشار جبهه شعله و بررسی پارامترهای مؤثر بر انتشار شعله پیش آمیخته مخلوط متان و هوا می باشد. به طور کلی از مهمترین اهداف این رساله می توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- ۱- بررسی انتشار جبهه شعله و فشار حاصل از احتراق در مخلوط متان و هوا با حضور موانع (متخلخل و صفحات سوراخ دار) و بدون حضور موانع
- ۲- بررسی تأثیر تغییر خصوصیات موانع نظیر (تعداد، ضخامت، فاصله و قطر منافذ) و همچنین شرایط اولیه سوخت مانند (فشار اولیه و نسبت هم ارزی) بر سرعت انتشار شعله و فشار حاصل از احتراق
- ۳- بررسی الگوی خاموشی شعله و عوامل مؤثر بر تغییر الگوی خاموشی

۱-۵- نوآوری رساله

با توجه به تحقیقات صورت گرفته در خصوص انتشار شعله مخلوط متان و هوا با استفاده از موانع متخلخل و صفحات سوراخ دار بیشتر به بررسی انتشار شعله، سرعت شعله و فشار حاصل از احتراق پرداخته شده است و توجه کمتری به بحث خاموشی شعله شده است. لذا مهمترین جنبه نوآوری پژوهش حاضر مطالعه آزمایشگاهی اثر خصوصیات موانع متخلخل و صفحات سوراخ دار بر خاموشی شعله و پارامترهای احتراقی نظیر انتشار جبهه شعله متان و هوا، سرعت شعله و فشار حاصل از احتراق می باشد. همچنین در این پژوهش به جهت بررسی مطالعه نحوه انتشار و خاموشی شعله از تکنیک های عکسبرداری با سرعت بالا با استفاده از دانش فنی نسبتاً نوین و به روز استفاده شده است. این پژوهش از منظر پدیده شناسی دارای نوآوری هایی به شرح ذیل می باشد:

(۱) مطالعه انتشار شعله پیش مخلوط متان و هوا بدون حضور و با حضور موانع متخلخل و صفحات سوراخ دار.

(۲) مطالعه اثر تعداد، ضخامت، قطر منافذ و موقعیت‌های مختلف قرارگیری موانع متخلخل و صفحات سوراخ

دار بر خاموشی شعله و تغییر پارامترهای احتراقی.

(۳) مطالعه اثر تغییرات فشار اولیه و نسبت هم‌ارزی سوخت بر فشار حاصل از احتراق و سرعت انتشار شعله

در حضور موانع متخلخل و صفحات سوراخ دار.

(۴) مطالعه الگوی خاموشی شعله و عوامل موثر بر آن با حضور موانع متخلخل و صفحات سوراخ دار

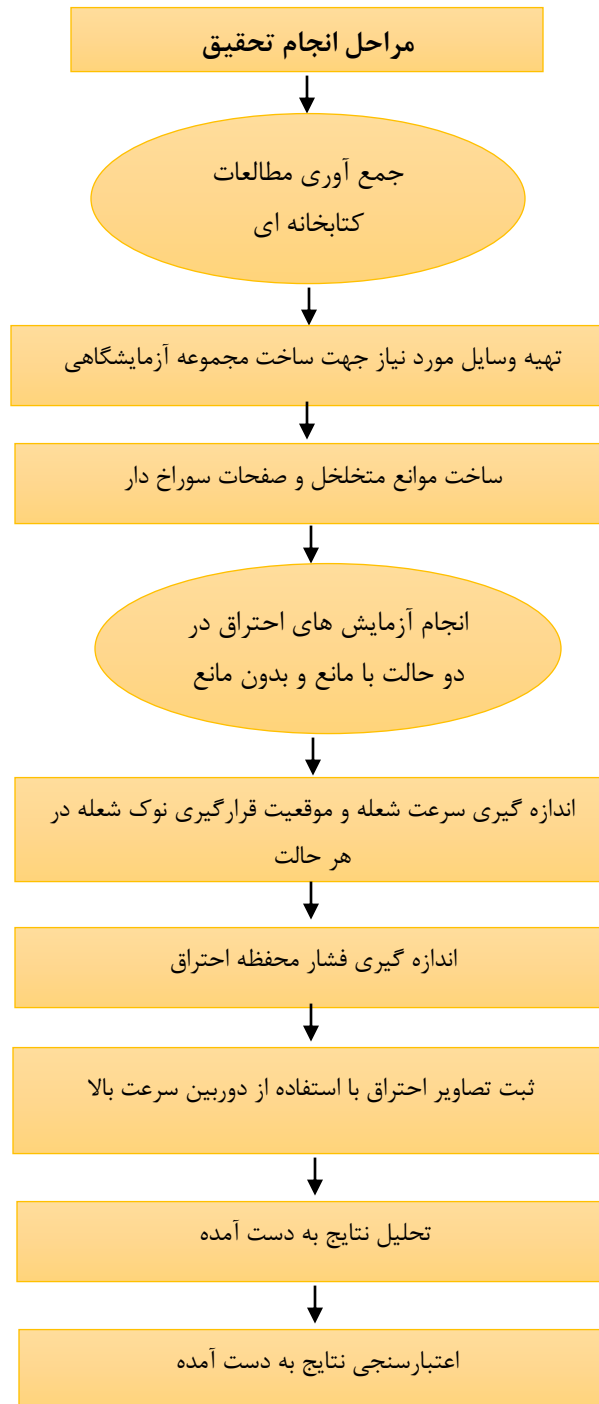
(۵) پیش‌بینی عملکرد و توسعه مدل آزمایشگاهی با استفاده از اعداد بی بعد

۱-۶- کاربردهای رساله

احتراق گازهایی همچون هیدروژن، متان، پروپان و اتیلن به طور گسترده‌ای در زندگی روزمره و صنایع استفاده می‌شوند و به طور خاص در مهندسی پتروشیمی، تولید برق، متالورژی، معدن و غیره کاربرد بسیار دارد. گازها در فرآیندهای تولید، انتقال، ذخیره‌سازی و مصرف، به دلیل میل بسیار زیاد به اشتعال و انفجار، مواد بسیار خطرناکی هستند. مخلوط قابل اشتعال می‌تواند در اثر نشت تصادفی گاز به داخل هوا یا نفوذ هوا به داخل مخزن و لوله حاوی گاز تشکیل شود. این مخلوط قابل اشتعال که اصطلاحاً پیش اختلاط نامیده می‌شود بی‌نهایت خطرناک و ریسک انفجار بالایی را دارد. از مهم‌ترین کاربردهای محیط‌های متخلخل و صفحات سوراخ‌دار در طراحی و تولید سیستم‌های مختلف به منظور جلوگیری و افزایش خصوصیات ایمن سازی بخش‌ها و صنایع فوق می‌باشد. در بسیاری از مشعل‌های متخلخل و کاربردهای بازدارنده جلوگیری از ایجاد انفجار در معادن زغال‌سنگ و تونل‌ها، ایمنی در زمان بهره‌برداری و ذخیره‌سازی سوخت‌های گازی مانند هیدروژن و متان و همچنین درک عمیق‌تری از برخورد جبهه شعله و موج فشار و احتراق در بخش‌های مختلف مانند طراحی موتورهای احتراق داخلی و غیره اشاره کرد. از این رو مطالعه رفتار شعله در شرایط مختلف دارای اهمیت بسیار ویژه‌ای می‌باشد.

۷-۱- مراحل انجام رساله

مراحل انجام رساله در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: مراحل انجام رساله

۱-۸- ساختار رساله

این تحقیق با توجه به شکل (۱-۲) در ۶ فصل ارائه شده است:

فصل اول: در این فصل به طور خلاصه کلیاتی در زمینه‌ی موضوع تحقیق، ضرورت بررسی آن و هدف از انجام آن ذکر شده است.

فصل دوم: در این فصل تئوری احتراق مورد مطالعه قرار گرفته است.

فصل سوم: فصل سوم شامل بررسی سابقه علمی موضوع، نتایج و روابط ارائه شده می باشد.

فصل چهارم: در این فصل آماده سازی دستگاه احتراق و تجهیزات مورد نیاز برای انجام آزمون احتراق، به طور کامل شرح داده شده است.

فصل پنجم: در این فصل نتایج حاصل از آزمون احتراق مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

فصل ششم: در این فصل نتایج حاصل از تحقیق و همچنین پیشنهادهایی به منظور بهبود تحقیقات آتی ارائه شده است.

•مقدمه و کلیات	۱
•بررسی تئوری احتراق	۲
•سابقه علمی موضوع	۳
•آماده سازی دستگاه احتراق و انجام تست های احتراق	۴
•تحلیل نتایج حاصل از آزمون احتراق	۵
•نتیجه گیری و پیشنهادها	۶

شکل ۱-۲: ساختار رساله

فصل دوم

تئوری احتراق و شعله پیش مخلوط

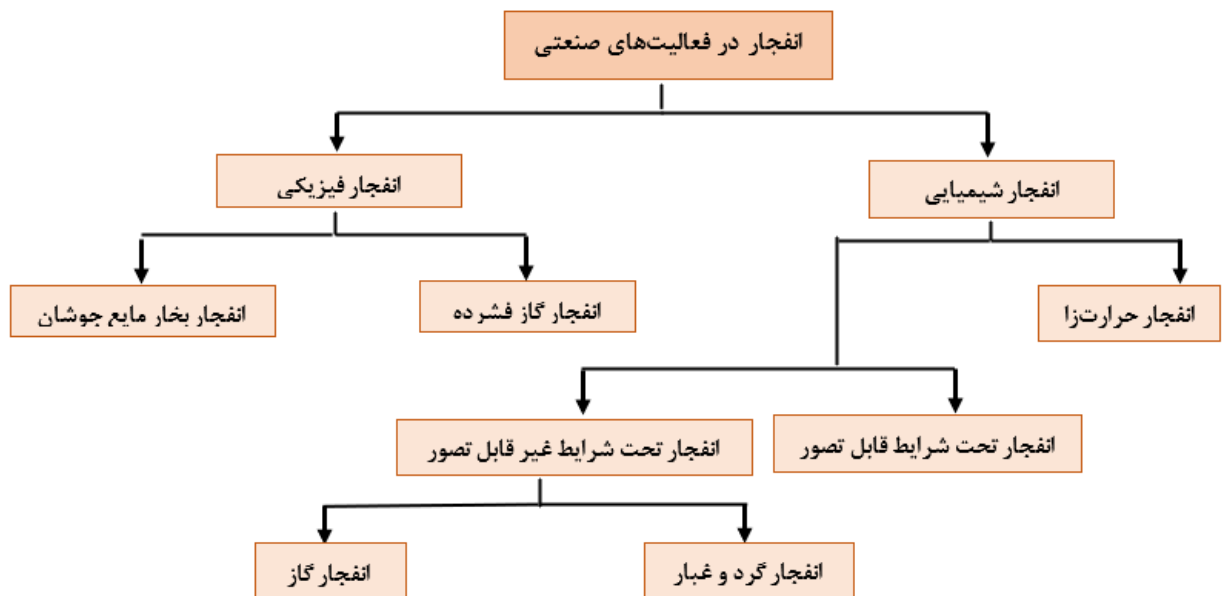
۲-۱- مقدمه

فرآیند احتراق عبارت از ترکیب مواد مختلف با اکسیژن که همراه با تولید حرارت و نور می‌باشد و می‌توان آن را با یک معادله شیمیایی بیان کرد. انتشار شعله جریانی است که در طی واکنش‌های شیمیایی با سرعت زیاد، افزایش سریع دما و ظهور منطقه نورانی را به همراه دارد [۱]. شعله‌های ثابت دو نوع کلی دارند [۲]:

- شعله‌های پیش مخلوط که در آن واکنش دهنده‌ها قبل از نزدیک شدن به منطقه شعله مخلوط می‌شوند.
- شعله‌های نفوذی که در آن هر دو اختلاط سوخت و هوا و احتراق در سطح مشترک رخ می‌دهند [۳].

۲-۲- انواع سناریو احتراق

در شکل ۱-۲ مهم‌ترین انواع انفجار در فعالیت‌های صنعتی را نشان داده شده است.



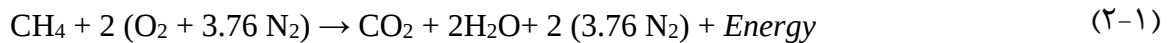
شکل ۱-۲: انواع انفجار در فعالیت‌های صنعتی [۴]

براساس راحت اکسید شدن، چهار حالت اساسی احتراق مخلوط متان و هوا وجود دارد که به شرح ذیل می‌باشد:

۲-۲-۱- سوختن

سوزاندن گاز، مایع یا جامدی که در آن سوخت اکسید می‌شود شامل آزاد شدن گرما و اغلب انتشار نور است.

احتراق گاز متان (CH_4) در هوا را می‌توان با معادله شیمیایی ۱-۲ توصیف کرد [۵].



محصولات شیمیایی حاصل از احتراق کامل یک سوخت هیدروکربنی عمدتاً CO_2 و H_2O (بخار آب) هستند. فرآیند احتراق منجر به افزایش دما به دلیل تبدیل انرژی شیمیایی به گرما می‌شود. باید تاکید کرد که معادله فوق یک ساده سازی قوی از فرآیند احتراق واقعی را تشکیل می‌دهد.

احتراق سوخت گازی در هوا می‌تواند در دو حالت مختلف رخ دهد. یکی در جایی که سوخت و اکسیژن در طی فرآیند احتراق مخلوط می‌شود. در حالت دیگر، سوخت و هوا (یا اکسید کننده دیگری) از قبل مخلوط شده و غلظت سوخت باید در محدوده اشتعال پذیری باشد. به طور کلی وضعیت پیش آمیخته اجازه می‌دهد سوخت سریعتر بسوزد، یعنی سوخت بیشتری در واحد زمان مصرف می‌شود [۵].

۲-۲-۲- احتراق ناگهانی

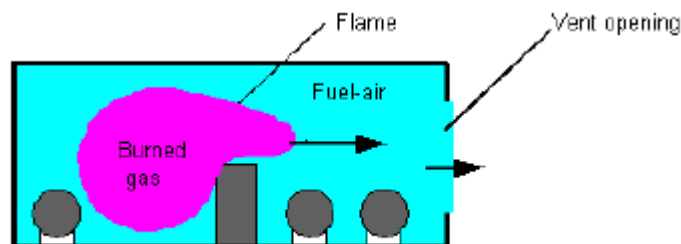
در شکل ۲-۲ ابری از گازهای قابل احتراق به طور ناگهانی در هوا پراکنده شده و تشکیل غلظت احتراقی را می‌دهد. احتراق توده مورد نظر نتیجه یک شعله گذرا در آن است که به آن احتراق ناگهانی گفته می‌شود. در یک انفجار گازی تصادفی از ابر هیدروکربن-هوا (که توسط منبع ضعیف جرقه زده می‌شود) شعله به طور معمول به صورت شعله آرام با سرعت ۳-۴ متر بر ثانیه شروع می‌شود. اگر جریان انتشار گازها بدون محدودیت و بدون مانع باشد (یعنی هیچ وسیله ای یا سازه های دیگری توسط ابر فرو نروند) شعله به سرعت حدود ۲۰ تا ۲۵ متر بر ثانیه شتاب می‌گیرد [۶].



شکل ۲-۲: احتراق ناگهانی گرد آلومینیوم [۷].

۲-۲-۳- انفجار

انفجار گاز به عنوان فرآیندی تعریف می‌شود که در آن احتراق یک ابر گازی از پیش مخلوط شده، یعنی سوخت-هوا یا سوخت-اکسید کننده باعث افزایش سریع فشار می‌شود. انفجار گاز می‌تواند در داخل تجهیزات یا لوله‌های فرآیندی، در مناطق بسته یا در مناطق باز و نامحدود رخ دهد [۸]. شکل ۲-۳ نمونه‌ای از انفجار در یک محیط بسته را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳: نمونه‌ای از انفجار در یک محیط بسته با حضور موانع [۸].

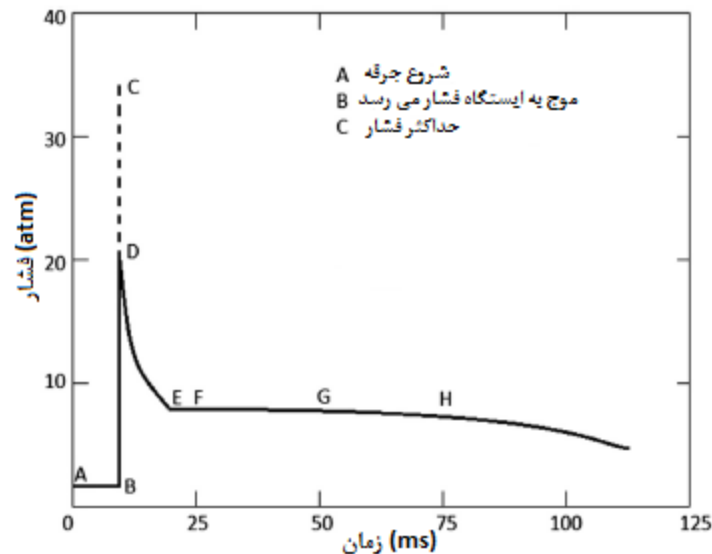
اگر ابر گازی که از رهاسازی ایجاد شده است در محدوده اشتعال پذیری نباشد یا منبع احتراق کم باشد، ممکن است ابر گاز رقیق شده و ناپدید شود. بسته به شرایط، احتراق ممکن است بلافاصله رخ دهد یا ممکن است

تا ده‌ها دقیقه به تأخیر بیفتد. در صورت تشکیل و احتراق یک ابر بزرگ مخلوط سوخت و هوا، خطرناک‌ترین وضعیت پیش می‌آید. زمان شروع رها سازی تا اشتعال می‌تواند از چند ثانیه تا ده دقیقه باشد. میزان سوخت می‌تواند از چند کیلوگرم تا چند تن باشد. فشار ایجاد شده توسط موج احتراق بستگی به سرعت انتشار شعله و چگونگی گسترش فشار از ابر گازی دارد. پیامدهای انفجار گازها از خسارت تا تخریب کامل متغیر است. افزایش فشار ناشی از انفجار گاز می‌تواند به پرسنل و مواد آسیب برساند یا منجر به حوادثی مانند آتش سوزی و BLEVE¹ (انفجار ناشی از افزایش فشار بخار حاصل از جوشیدن مایع) و اثرات دومینو می‌شود [۹].

موج فشار ایجاد شده در واقع همان امواجی هستند که با سرعت صوت حرکت می‌کنند. طبق رابطه سرعت صوت ($C = \sqrt{KRT}$) وقتی یک انفجار رخ می‌دهد، قسمت‌های جلوی شعله گرم‌تر می‌شود، در این حالت T نسبت به حالت قبل از ایجاد شعله افزایش یافته و باعث افزایش سرعت صوت در این حالت می‌گردد. در حالت انفجار، سرعت شعله معمولی (یعنی نسبت به یک ناظر ثابت) از ۱ تا ۱۰۰۰ متر بر ثانیه است. بسته به سرعت شعله، فشار انفجار ممکن است به چندین بار برسد.

سرعت سوختن اکثر گازهای قابل احتراق در محیط‌های بسته، فقط چند سانتی متر بر ثانیه است. اما می‌تواند در غلظت استوکیومتری ۴۰ تا ۵۰ سانتی‌متر در ثانیه افزایش یابد. حداکثر سرعت شعله را می‌توان تقریباً هشت برابر سرعت شعله آرام، یعنی حدود ۴۰۰ سانتی‌متر بر ثانیه (۱۳/۱ فوت در ثانیه) تخمین زد. سرعت انفجار گازهای معدنی معمولی بین ۲۵۰۰ تا ۲۷۰۰ متر بر ثانیه است. فقط هیدروژن دارای سرعت انفجاری است که نزدیک به ۳۰۰۰ متر بر ثانیه است. در همه موارد، حداکثر مقدار غلظت قابل احتراق کمی بالاتر از غلظت استوکیومتری حاصل می‌شود. هنگامی که انفجار گاز با فضای محدود منعکس شود، می‌تواند فشارهای بیشتری ایجاد کند که باعث افزایش سرعت انفجار می‌شود. شکل ۲-۴ نمودار فشار در واحد زمان برای انفجار یک گاز را در محیط بسته نمایش می‌دهد [۱۰].

¹- Boiling liquid Expanding Vapor Explosion



شکل ۲-۴: نمودار فشار در واحد زمان انفجار گاز در یک محیط بسته [۱۰].

طبق تئوری احتراق، فرآیند واکنش احتراق متان زنجیره‌ای است. در واقع انفجار به دلیل خوشه‌ای شدن واکنش‌ها رخ می‌دهد. در واقع انفجار به دلیل رادیکالی شدن متان و اکسیژن در واکنش رخ می‌دهد. هنگامی که فشار اولیه کم باشد، مولکول‌های گازی موجود در مخلوط‌های ترکیبی از یکدیگر دور هستند و اتم‌های آزاد به راحتی در دیواره پخش می‌شوند تا از بین بروند و واکنش احتراق متان را مهار می‌کنند، در حالی که اکسیژن کم (فشار اولیه کم) منجر به کاهش شدت انفجار مخلوط متان و هوا می‌شود. در فشار اولیه بالا، فشار جزئی گاز متان در حال بزرگتر شدن است و فاصله بین مولکول‌های گازی کاهش می‌یابد و زمان برخورد مؤثر اغلب بیش‌تر می‌شود و باعث پیشرفت بیش‌تری در سرعت واکنش زنجیره‌ای می‌شود. میزان اکسیژن با کاهش فشار اولیه کاهش می‌یابد و می‌تواند سوخت‌های بیش‌تری را اکسید کند. علاوه بر این، فشار اولیه بالا، اشتعال‌پذیری گاز را افزایش می‌دهد و واکنش شیمیایی آن را سریع‌تر و قوی‌تر می‌کند [۱۱].

حداقل انرژی اشتعال (MIE^1) برای گازهای قابل احتراق برای محیط‌های هوا و اکسیژن در یک محیط بسته

در جدول ۲-۱ آورده شده است. به طور کلی، حداقل انرژی احتراق همه هیدروکربن‌ها ۰/۲۵ میلی‌ژول است [۱۲].

¹- Minimum Ignition Energy

جدول ۲-۱: حداقل انرژی اشتعال برای گازهای موجود در محیط بسته در فشار ۱ اتمسفر [۱۲]

حداقل انرژی احتراق (میلی ژول)		گازهای قابل احتراق
اکسیژن	هوا	
۰/۰۰۳	۰/۳۰	متان
۰/۰۰۲	۰/۲۶	اتان
۰/۰۰۲	۰/۲۶	پروپان
۰/۰۰۹	۰/۲۶	بوتان
۰/۰۰۰۲	۰/۰۱۷	استیلن
۰/۰۰۱۲	۰/۰۱۷	هیدروژن
۰/۰۱	۰/۰۷	اتیلن

خسارت‌های ناشی از انفجار گاز به موارد زیر بستگی دارد [۱۱]:

- ✓ نوع سوخت و اکسنده
- ✓ اندازه و غلظت سوخت ابرهای قابل احتراق
- ✓ محل نقطه اشتعال
- ✓ قدرت منبع احتراق
- ✓ اندازه، محل و نوع مناطق تهویه انفجار
- ✓ محل و اندازه تجهیزات ساختاری

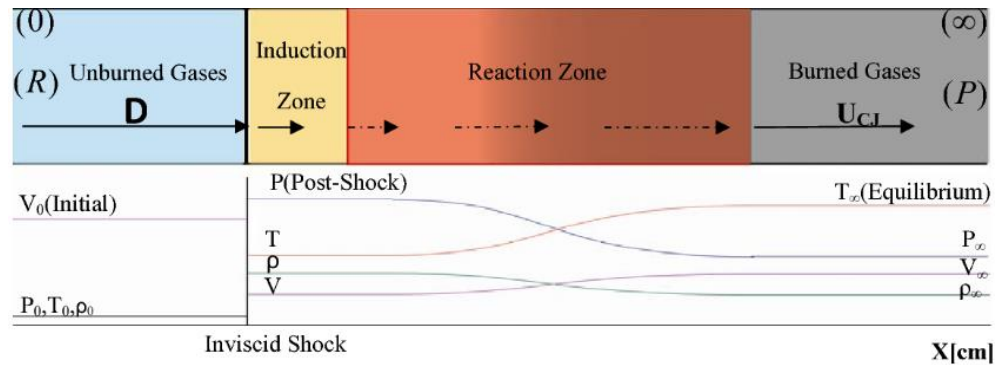
۲-۲-۴- انفجار شدید

فرآیند افزایش موج فشار از یک موج انفجار کند به عنوان گذار از انفجار کند به انفجار شدید^۱ شناخته می‌شود. در این حالت مطابق شکل ۲-۵ و نظریه ZND^۲، انفجار به عنوان یک موج احتراق منتشر می‌شود که با سرعت مافوق صوت نسبت به گاز سوزانده نشده بلافاصله قبل از شعله پخش می‌شود. در مدل ZND، موج انفجار به عنوان یک موج ضربه‌ای و به دنبال آن یک جبهه عکس العمل به تصویر کشیده شده است [۱۳]. در حقیقت

^۱ Deflagration to Detonation Transition

^۲ Zeldovich- von Neumann- Doering

موج انفجار در این حالت یک جبهه موج دو بعدی نیست بلکه از موج‌های کوچکتر تشکیل شده است که ساختارهای سلولی به شکل الماس را در پشت خود ایجاد کرده است.

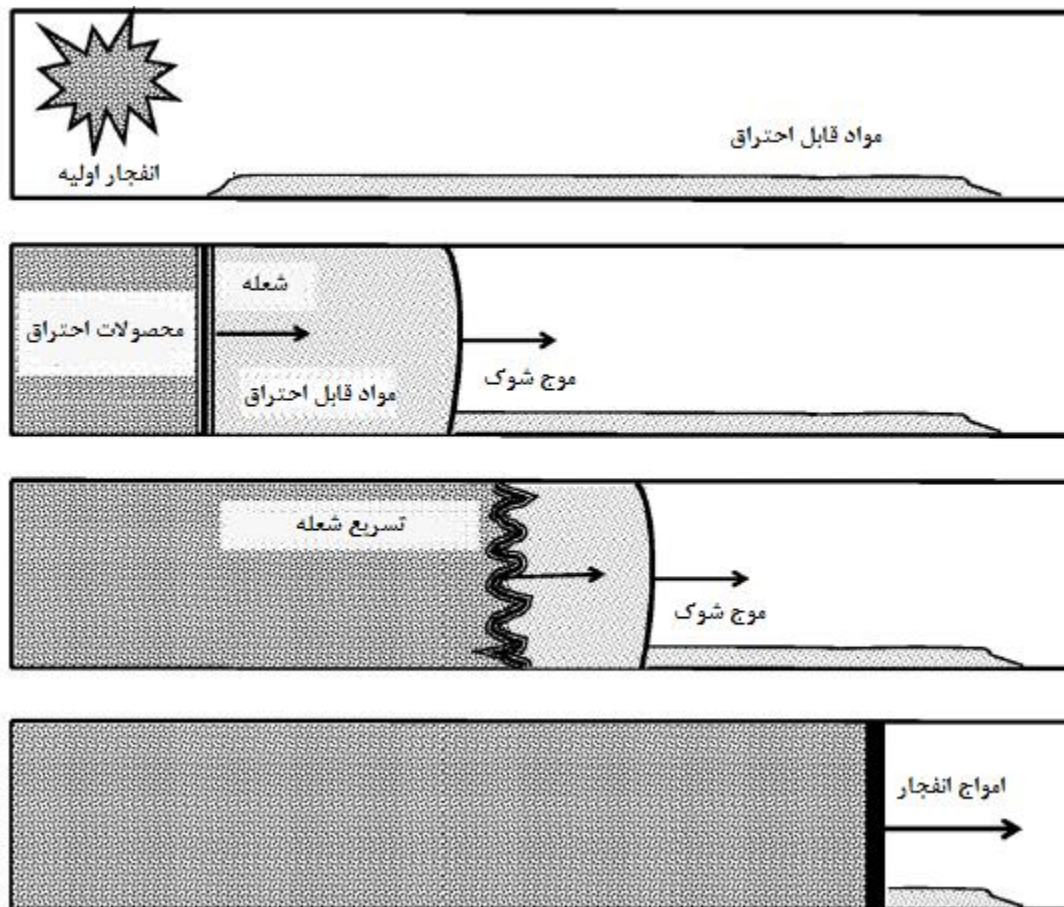


شکل ۲-۵: مدل ZND [۱۳]

در این حالت در یک ابر سوخت-هوا، یک موج انفجار با سرعت ۱۵۰۰-۲۰۰۰ متر بر ثانیه منتشر می‌شود و حداکثر فشار معمولاً ۱۵ تا ۲۰ بار است. در یک ساختمان یا در یک مازول دریایی با تجهیزات، شعله ممکن است تا چند صد متر در ثانیه شتاب گیرد. هنگامی که گاز در حال سوختن است، دما افزایش می‌یابد و گاز تا ۸ یا ۹ برابر منبسط می‌شود. بنابراین گاز نسوخته دچار تغییر می‌گردد و یک میدان جریان آشفته ایجاد می‌شود. هنگامی که شعله در یک میدان جریان آشفته منتشر می‌شود، سرعت سوزاندن موثر افزایش می‌یابد و سرعت جریان و تلاطم پیش از شعله بیشتر افزایش می‌یابد. این مکانیزم بازخورد مثبت قوی باعث شتاب شعله و فشارهای بالای انفجار می‌شود [۱۳].

شتاب شعله زمانی به وجود می‌آید که نرخ سوختن توده به دلیل تأثیر اختلال هوایی افزایش پیدا کند. گرمای به وجود آمده از فرآیند احتراق باعث انبساط موضعی گاز سوخته می‌شود. گسترش گاز سوخته باعث شتاب سرعت شعله می‌شود و باعث افزایش نرخ سوزش می‌شود. افزایش نرخ سوزش باعث افزایش نرخ حرارت آزاد شده می‌شود که به نوبه خود باعث شتاب حرکت شعله می‌شود. این شتاب شعله باعث بزرگنمایی انفجار می‌شود. این شتاب شعله می‌تواند به صورت محصور شده و محصور نشده باشد. شتاب شعله محصور نشده معمولاً انفجار ثانویه نامیده می‌شود. این مورد با توجه به وجود موانع انجام می‌شود. مطابق شکل ۲-۶، انفجار اولیه در یک محفظه باعث

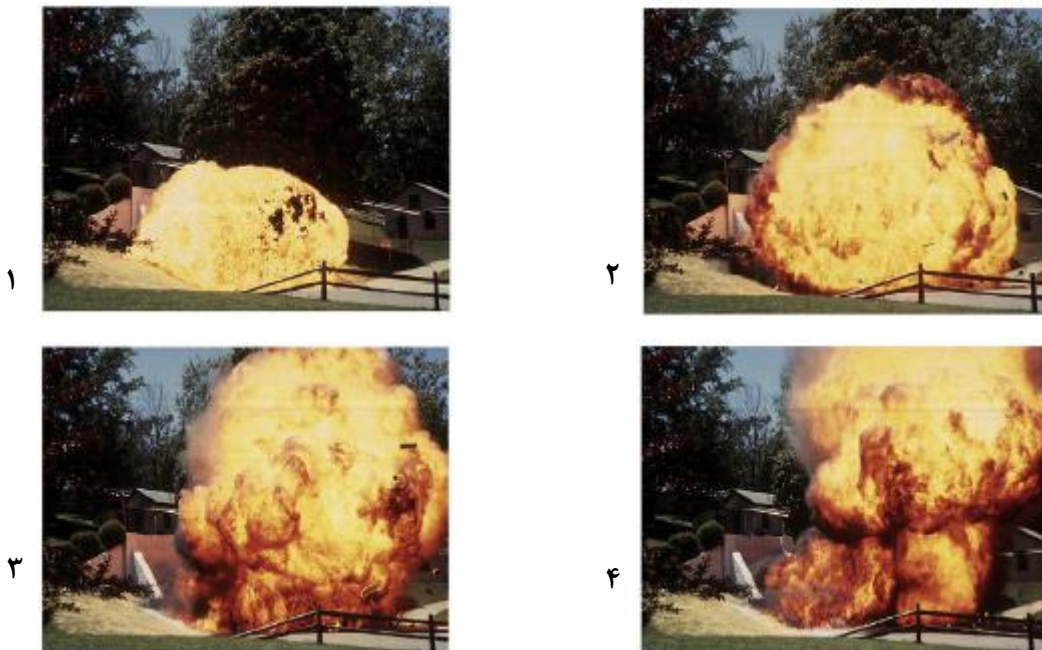
متلاشی شدن آن می‌شود. انتشار ناگهانی فشار بالا از محفظه متلاشی شده باعث به وجود آمدن یک موج شوک می‌شود. این موج شوک به سمت خارج انتشار می‌یابد و در این حالت شعله آهسته‌تر از محفظه خارج شده و سپس انفجار ثانویه و تعقیب موج شوک را خواهیم داشت [۱۴].



شکل ۲-۶: نمایش خطر انفجار ثانویه و شتاب شعله [۱۴].

مصرف سوخت جدید باعث افزایش سرعت سوختن و در نتیجه افزایش سرعت شعله می‌شود. حضور موانع در مسیر شعله می‌تواند تلاطم اضافی تولید کند که باعث افزایش سرعت سوختن سوخت می‌شود. خطر اصلی حرارتی است که در اثر برخورد شعله و گازهای گرم ایجاد می‌شود. شتاب شعله به طور قابل توجهی خطرناک‌تر از شعله‌ای می‌باشد که در محفظه رخ می‌دهد. شتاب شعله در یک کانال (محیط بسته) سریع‌تر و شدیدتر از شتاب شعله در سطح آزاد می‌باشد. دلیل آن این است که محصولات احتراق گازی گرم و فشرده در کانال تنها در یک جهت

گسترش می‌یابند. انتشار شعله محصور باعث شکل‌گیری یک موج شوک و تشدید سرعت شعله به دلیل اختلال هوایی می‌شود، این امر منجر به افزایش فشار می‌شود [۱۴]. شکل ۲-۷ یک نمونه انفجار با افزایش شتاب شعله را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۷: مراحل انفجار شدید یک مخلوط انفجاری همراه با شتاب شعله در معدن بروتون [۱۵].

۲-۳- انواع شعله

در انواع احتراق، شعله بعد از اعمال جرقه آغاز و در مخلوط نسوخته منتشر می‌گردد و موجب تشکیل موج احتراق می‌شود. اساساً این موج می‌تواند یک فرآیند با شتاب یا حتی انفجار را در شرایط مناسب ایجاد کند. با یک جرقه ضعیف شعله‌های پیش آمیخته در یک محفظه به طور معمول از آرام و چین‌دار به شعله‌های آشفته و یا احتمالاً انفجار تبدیل می‌شوند [۲]. با توجه به نوع احتراق در ادامه به بررسی انواع شعله پرداخته می‌شود.

۲-۳-۱- شعله نفوذی^۱

شعله نفوذی یکی از انواع شعله است که در آن سوخت و اکسید کننده قبل از رسیدن به محفظه احتراق، مخلوط نمی‌شوند و به عبارت دیگر اختلاط سوخت و اکسیدکننده در مقایسه با شدت واکنش‌ها کند می‌باشد و در یک منطقه واکنش از طریق نفوذ مولکولی و تلاطمی به هم می‌رسند. لذا اختلاط، شدت سوختن را کنترل می‌کند. اغلب سیستم‌های احتراق از قبیل موتورهای دیزلی، توربین‌های گاز، شعله کبریت و شمع همگی از نوع شعله نفوذی‌اند و در این طبقه بندی قرار می‌گیرند. این نوع شعله به دلیل کاربردهای صنعتی آن از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است و بسیاری از کوره های صنعتی و تجهیزات حرارتی از نوعی شعله نفوذی بهره می‌گیرند. لذا کنترل پارامترهای شعله نفوذی نظیر میزان تولید NO_x، طول شعله، پایداری شعله و میزان انتشار آن مهم و مورد توجه می‌باشد. در همین راستا از اهرم‌های مختلفی نظیر سرعت جریان، رقیق سازی، پیش گرم کردن، هندسه مشعل، فشار و گرانش می‌توان جهت کنترل شعله استفاده کرد [۱۶].

۲-۳-۲- شعله پیش آمیخته (همگن)^۲

در شعله پیش آمیخته، سوخت و هوا ابتدا کاملاً مخلوط می‌شود و سپس با زدن یک جرقه واکنش‌های اصلی احتراق صورت می‌گیرد به طوری که ابتدا از محل جرقه شعله‌ای ایجاد می‌شود و شروع به حرکت می‌کند. با حرکت شعله به سمت مخلوط نسوخته جلوی آن، محصولات احتراق در پشت آن باقی می‌مانند. سطح مشترک قسمت‌های سوخته شده و نسوخته را که در آن واکنش شیمیایی شدید می‌باشد جبهه‌ی پیشانی شعله می‌گویند. این جبهه با سرعت معینی به نام سرعت شعله به سمت قسمت نسوخته حرکت می‌کند. در این نوع شعله هوا و سوخت وارد محفظه اختلاط می‌شود و پس از تکمیل اختلاط، احتراق صورت می‌گیرد. احتراق در موتورهای اشتعال جرقه‌ای، چراغ بونسن و اجاق گاز از نوع پیش آمیخته است چون انفجار این نوع مخلوط نسبت به شعله نفوذی میسر است و از ایمنی کمتری برخوردار است [۱۷].

¹- Diffusion

²- Premixed Flame

شعله پیش آمیخته به دو دسته شعله آرام^۱ و شعله آشفته^۲ تقسیم می‌شوند که در ادامه به بررسی آنها پرداخته شده است.

۲-۴- شعله آرام

جبهه شعله آرام عاری از هر گونه چین خوردگی است. در بیشتر مواقع شعله آرام، براساس حرکات دائمی شعله تخت یک بعدی در دامنه‌ای که از دو طرف نامحدود است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این حالت، لایه‌ای بسیار نازک که به آن ضخامت شعله گفته می‌شود مرز بین ناحیه سوخته و نسوخته را تشکیل می‌دهد [۱۸]. ساختار شعله و سرعت سوختن دو پارامتر مهم و اساسی در انتشار شعله آرام می‌باشد. ساختار شعله و سرعت سوختن آرام به طور عمده توسط سینتیک شیمیایی، خواص ترموفیزیکی و خواص انتقالی، گونه‌های شیمیایی در داخل جبهه شعله تعیین می‌شود. در بیشتر موارد واکنش‌های شیمیایی در محدوده نازک محلی شعله آرام رخ می‌دهند و حتی در احتراق آشفته این چنین است. اثرات آشفته‌گی به طور کلی ناشی از بهم ریختگی و چروک شدن جریان آشفته بر روی شعله آرام می‌باشد [۱۹]. مهمترین پارامترهای مورد بررسی در شعله آرام عبارتند از:

۲-۴-۱- ساختار شعله آرام

ساختار یک بعدی شعله پیش آمیخته در شکل ۲-۸ آورده شده و باید توجه داشت در انتشار شعله پیش آمیخته جبهه شعله در حال پیشروی به سمت مخلوط نسوخته بوده و این ساختار از منظر ناظر واقع بر جبهه شعله می‌باشد. شعله را می‌توان به چهار قسمت تقسیم کرد [۲۰].

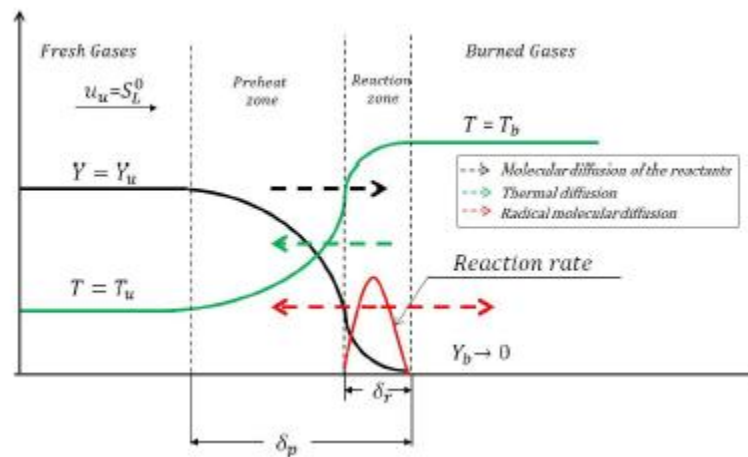
الف) ناحیه مخلوط نسوخته که شامل مخلوط سوخت-اکسنده سرد است. پروفیل متغیرها بدون تغییرات می‌باشند.
ب) ناحیه پیش گرم که در آن گرمای آزاد شده از واکنش‌های شیمیایی ناحیه جلویی از طریق هدایت حرارتی به آن منتقل شده و مخلوط نسوخته پیش گرم می‌شود. فرایند پیش گرم اثر مثبتی بر انجام واکنش‌های شیمیایی دارد.

¹- Laminar Flame

²- Turbulent Flame

ج) ناحیه واکنش؛ واکنش های شیمیایی در این ناحیه رخ داده و مخلوط مصرف شده، گرما و محصولات احتراق تولید می گردد. گرمای آزاد شده از واکنش ها دلیل اصلی انبساط محصولات احتراق می باشد.

د) ناحیه تعادل؛ در این ناحیه مخلوط سوخته شده و تمام متغیرها به حالت تعادل رسیده اند و مشابه ناحیه مخلوط نسوخته پروفیل متغیرها بدون تغییر می باشند.



شکل ۸-۲: طرح ساده از ساختار جبهه شعله آرام [۲۰]

همانطور که در شکل ۸-۲ نشان داده شده است، ساختار شعله به دو ناحیه مجزا تقسیم می شود: یک ناحیه واکنش (ضخامت δ_r) که در آن واکنش دهنده ها و انتشار یافته ها در تعادل هستند. و دیگری منطقه پیش گرم (ضخامت δ_p) که در آن جابجایی و انتشار در تعادل است. فرض بر این است که $\delta_r \ll \delta_p$. در ناحیه واکنش،

پروفیل سرعت واکنش از اثر ترکیبی فعال شدن واکنش و تخلیه واکنش دهنده ها حاصل می شود [۲۰].

ضخامت شعله آرام شامل ناحیه واکنش ها و پیش گرمایش می باشد و به صورت تئوری از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\delta_L = \frac{\lambda_u}{\rho_u c_p S_L} \quad (2-2)$$

که λ_u و ρ_u ، c_p ، S_L به ترتیب سرعت شعله آرام، گرمای ویژه فشار ثابت، چگالی و ضریب هدایت حرارتی مخلوط نسوخته می‌باشد. این ضخامت تئوری از ضخامت واقعی شعله بسیار کوچکتر است. ضخامت شعله پیش آمیخته بسیار کوچک است و به طور کلی کسری از ۱ میلی‌متر است، به عنوان مثال برای مخلوط‌های هیدروژن-هوا با نسبت هم ارزی^۱ ۰/۷ و ۰/۴، در دما و فشار نرمال ضخامت شعله ۰/۳۵ و ۰/۴۳ میلی‌متر می‌باشد [۲۰].

۲-۴-۲- سرعت شعله آرام^۲

در سال ۱۸۸۳، مالارد^۳ و لی شاتلیه^۴ نظریه‌ای پیشنهاد دادند که در آن پیش‌بینی شده بود سرعت شعله آرام (S_L) به نرخ واکنش کلی^۵ و نفوذپذیری حرارتی^۶ وابسته است [۲۱]. مالارد و لوشاتلیه طبق شکل ۲-۸، شعله را به دو ناحیه تقسیم نمودند؛ ناحیه پیش گرمایش که در آن گاز از طریق رساناش گرم می‌شود و ناحیه واکنش که آنتالپی شیمیایی به آنتالپی محسوس تبدیل می‌شود. افزایش دما در منطقه پیش گرم به علت شار حرارتی از جانب منطقه واکنش است. در این ناحیه گرمای کمی آزاد می‌شود. قسمت اول منطقه واکنش ناحیه نازکی است که واکنش‌های شیمیایی سرعت زیادی دارند. در این منطقه واکنش‌های مولکولی غالب است و مولکول‌های سوخت به سرعت شکسته می‌شوند و گونه‌های واسطه‌ای زیادی شکل می‌گیرد. در قسمت دوم منطقه واکنش، واکنش‌های ترکیب مجدد ریشه‌های سه گانه غالب است که بسیار کندتر است. این منطقه بسیار ضخیم‌تر از قسمت اول می‌باشد [۲۱].

با نوشتن معادله موازنه انرژی در ناحیه پیش گرمایش، معادله ۲-۳ حاصل می‌شود:

$$\dot{m}c_p(T_i - T_o) = \lambda \frac{T_f - T_i}{\delta_r} \quad (2-3)$$

¹ Equivalence ratio

²- Laminar Flame Speed

³- Mallard

⁴- Le- Chatelier

⁵- Overall reaction rate

⁶- Thermal diffusivity

که λ رسانایی حرارتی، C_p حرارت ویژه و δ_r ضخامت ناحیه واکنش است. زیرنویس های i و o به ترتیب نماینده شعله، نسوخته و اشتعال اند.

شار جرمی در واحد سطح $\dot{m}$ بدین شکل تعریف می شود:

$$\dot{m} = \rho_u S_L \quad (2-4)$$

که ρ_u چگالی گاز نسوخته و S_L سرعت شعله آرام است. از معادله های (۲-۳) و (۲-۴) سرعت شعله آرام به دست می آید.

$$S_L = \left(\frac{\lambda(T_f - T_i)}{\rho_u C_p (T_i - T_o)} \frac{1}{\delta_r} \right) \quad (2-5)$$

اگر τ_i زمان واکنش باشد می توان نوشت:

$$\delta_r = S_L \tau_r = S_L \frac{1}{d\varepsilon/dt} \quad (2-6)$$

که $d\varepsilon/dt$ نرخ واکنش و $(RR)^1$ متغیر نرخ واکنش است پس با جایگزینی معادله (۲-۶) در (۲-۵) معادله (۲-۷) حاصل می شود:

$$S_L = \left(\left(\frac{\lambda}{\rho_u C_p} \right) \frac{T_f - T_i}{T_i - T_o} \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right) \right)^{0.5} \propto (a \cdot RR)^{0.5} \quad (2-7)$$

در معادله (۲-۷) مالارد و لوشاتلیه نشان دادند که سرعت شعله، متناسب با جذر حاصل ضرب نفوذپذیری حرارتی در نرخ واکنش است. این نتیجه یکی از مهم ترین نتایج در نظریه سرعت شعله آرام است. همان طور که در قبل گفته شد، اساساً سرعت شعله در اثر تغییر نسبت هم ارزی (ϕ) ، در شرایط بی درو، با تغییر در دمای شعله ی بی درو تعیین می شود.

¹- Reaction Rate

زلدوویچ^۱، فرانک- کامنسکی^۲ و سیمنوف^۳ بعدها نظریه‌ی جامع سرعت شعله آرام را مطرح کردند. در این نظریه هم شعله به دو ناحیه پیش گرمایش و ناحیه واکنش تقسیم می‌شود ولی علاوه بر نفوذ حرارتی، نفوذ مولکولی هم در نظر گرفته می‌شود و در نتیجه معادله‌ی بقای اجزا نیز به همراه معادله‌ی حرارت باید حل شود. آن‌ها پیشنهاد کردند که دمای اشتعال خیلی نزدیک به دمای شعله‌ی بی‌درو است؛ بنابراین در تخمین نرخ واکنش به جای T_i از T_f استفاده کردند. با در نظر گرفتن شعله تک بعدی پایا و با فرض فشار و ضرایب رسانایی و حرارتی ثابت و با فرض نفوذ حرارتی و مولکولی یکسان، سرعت شعله آرام به شکل معادله (۲-۸) به دست می‌آید [۲۱].

$$S_L = \left(\frac{2\lambda}{C_p \rho_0} \frac{1}{a_i} \left(\frac{A e^{-a_i/R_w T_f}}{T_f - T_i} \right) \frac{R_w T_f^2}{E_0} \right)^{1/2} \quad (2-8)$$

در معادله (۲-۸)، ρ_0 چگالی قسمت نسوخته، a_i تعداد مولکول‌های ناحیه نسوخته بر واحد حجم، E_0 انرژی فعال‌سازی، R_w ثابت جهانی گاز و A ضریب ثابت است.

از معادله (۲-۸) می‌توان نتیجه گرفت که $S_L \propto \sqrt{a(RR)}_{T_f}$ ، فرق بین این نظریه و نظریه مالارد و لوشاتلیه این است که نرخ واکنش براساس دمای شعله است. هم‌چنین این معادله نشان می‌دهد افزایش انرژی فعال‌سازی باعث کاهش سرعت شعله می‌شود. عوامل تأثیر گذار بر سرعت شعله آرام را می‌توان با استفاده از معادله جامع (۲-۸) بررسی کرد. این عوامل عبارتند از نسبت هم‌ارزی، ساختار مولکولی، فشار اولیه مخلوط و دمای اولیه که در ادامه به بررسی تأثیر این عوامل بر سرعت شعله آرام پرداخته شده است.

¹- Zeldovich

²- Frank- Kaminski

³- Simnof

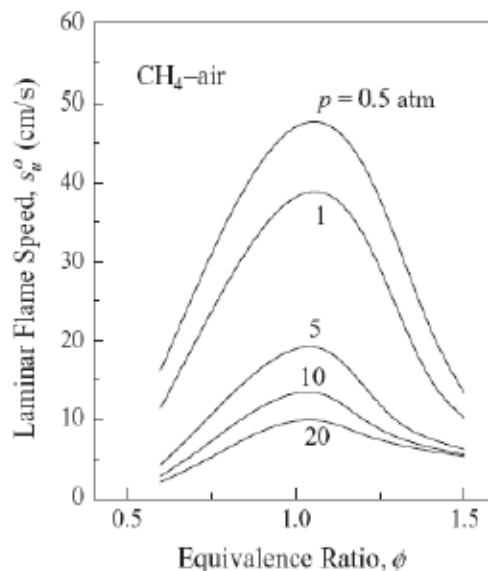
الف) نسبت هم ارزی:

نسبت هم ارزی در واکنش‌های احتراق، نشان دهنده‌ی ضعیف یا قوی بودن سوخت مخلوط اکسید کننده

است و طبق رابطه ۹-۲ محاسبه می‌شود [۲۲]:

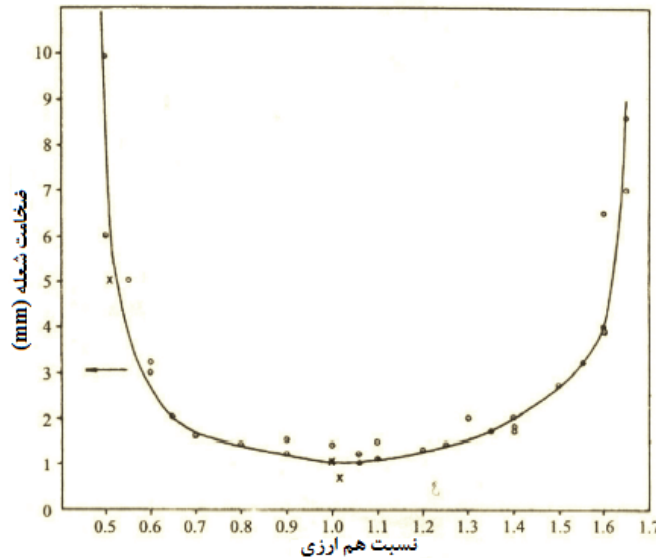
$$\phi = \frac{(\frac{F}{A})_{re}}{(\frac{F}{A})_{st}} \quad (9-2)$$

در این رابطه، $(\frac{F}{A})_{re}$ ، نسبت سوخت به هوا مخلوط در شرایط واقعی و $(\frac{F}{A})_{st}$ ، نسبت سوخت به هوا در شرایط استوکیومتری است. در سوخت‌های هیدروکربنی، بیشینه سرعت شعله در مخلوطی با نسبت هم ارزی یک اتفاق می‌افتد که علت آن کم‌تر بودن گرمای ویژه میانگین مخلوط در محصولات احتراق است (شکل ۹-۲). در مخلوط با نسبت هم ارزی کم‌تر از یک، اکسیژن بیش‌تری برای گرم کردن محصولات احتراق نیاز است، لذا دمای شعله نسبت به حالت نظری کاهش می‌یابد. در مخلوطی که نسبت هم ارزی بیش‌تر از یک است نیز اکسیژن کافی برای سوختن کامل کربن و هیدروژن سوخت موجود نیست و گرمای آزاد شده کم‌تر از حالت نظری است.



شکل ۹-۲. نمودار تغییرات سرعت شعله با نسبت هم ارزی سوخت متان و هوا [۲۲]

در شکل (۱۰-۲) نمودار تغییرات ضخامت شعله با نسبت هم ارزی آورده شده است. به طور کلی شعله در نسبت هم ارزی یک، کمترین ضخامت شعله را داراست.



شکل ۱۰-۲. نمودار تغییرات ضخامت شعله با نسبت هم ارزی سوخت متان [۲۲]

ب) ساختار مولکولی:

در هیدروکربن‌های اشباع (پارافین‌ها یا آلکان‌ها) با ساختار C_nH_{2n+2} افزایش تعداد کربن، تغییر زیادی در سرعت شعله‌ای آرام ایجاد نمی‌کند. در هیدروکربن‌های غیر اشباع (آلکن‌ها و آلکین‌ها) با ساختار C_nH_{2n} یا C_nH_{2n-2} ، افزایش تعداد کربن موجب کاهش سرعت شعله می‌شود.

تعداد متیل جایگزین شده در زنجیره و ساختار ملکولی تأثیر زیادی در سرعت شعله آرام دارد. گرشتاین^۱ و همکاران [۲۳] به این نتیجه رسیدند که تغییر سرعت شعله با تعداد گروه متیل جایگزین شده، به خاطر تغییر ساختار مولکولی نیست؛ بلکه به خاطر تغییر در دمای شعله است. از طرف دیگر تأثیر تعداد اتم کربن سوخت‌های مختلف بر سرعت شعله، در اثر تغییر دمای شعله نیست، چون دمای شعله بی‌دروا اکثر سوخت‌ها در شرایط استاندارد (۱ اتمسفر و ۲۹۸ کلوین) می‌باشد.

^۱ Gerstein

ج) فشار اولیه مخلوط

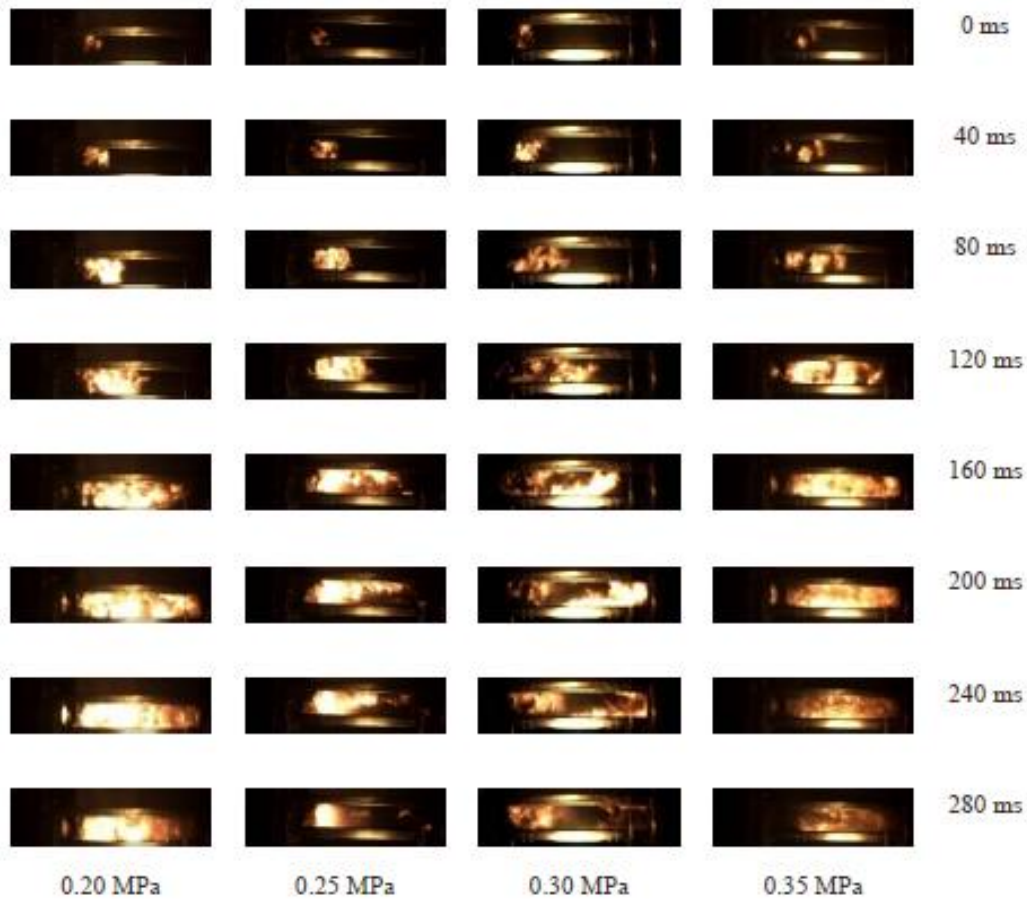
لوئیز [۲۴] تأثیر فشار را بر سرعت شعله آرام سوخت‌های هیدروکربنی مختلف مورد بررسی قرار داد و معادله‌ی توانی $S_L \propto P^L$ را ارائه نمود که L مشخصه‌ی فشار لوئیز است. او مشاهده نمود که وقتی $S_L < 0.5 m/s$ باشد، مقدار L معمولاً منفی خواهد بود که نشان می‌دهد سرعت شعله با افزایش فشار، کاهش می‌یابد. در محدوده $0.5 < S_L < 1 m/s$ سرعت شعله آرام مستقل از فشار است و برای $S_L > 1 m/s$ با افزایش فشار، سرعت شعله زیاد می‌شود.

از نظریه‌ی جامع سرعت شعله می‌توان نشان داد که ارتباط فشار با سرعت به صورت معادله ۲-۱۰ است که در آن n مرتبه واکنش است:

$$S_L \propto P^{(n-2)/2} \quad (2-10)$$

بنابراین با توجه به معادله ارائه شده توسط لوئیز می‌توان نتیجه گرفت که مرتبه‌ی واکنش در $S_L < 0.5 m/s$ کم‌تر از ۲ و در $0.5 < S_L < 1 m/s$ برابر با ۲ و در $S_L > 1 m/s$ بیش‌تر از ۲ خواهد بود. مشخص است برای واکنش‌های مرتبه دو، سرعت شعله وابسته به فشار نیست. لازم به ذکر است مرتبه واکنش برابر با مجموع ضرایب گونه‌های واکنش در واکنش‌دهنده‌ها است.

در شکل ۲-۱۱، تأثیر فشار اولیه بر انتشار شعله در یک محفظه بسته نشان داده شده است. زمان شروع جرقه (۰ میلی ثانیه) به عنوان زمان اولیه در نظر گرفته شده است و سایر تصاویر با فاصله ۴۰ میلی ثانیه انتخاب شده است. تصاویر نشان داده شده در هر ستون نشان دهنده انتشار شعله با فشار اولیه خاص است. در فشار اولیه ۰/۲ مگاپاسکال جبهه شعله نسبتاً صاف است. با افزایش فشار اولیه به ۰/۲۵ مگاپاسکال، در جبهه شعله چین و چروک دیده می‌شود. هنگامی که فشار اولیه به ۰/۳ مگاپاسکال یا ۰/۳۵ مگاپاسکال افزایش یابد، چین و چروک با وضوح بیشتری دیده می‌شود. به عنوان مثال در فشار اولیه ۰/۳۵ مگاپاسکال پس از وقوع انفجار شعله در زمان ۱۶۰ میلی ثانیه به انتهای دیواره می‌رسد اما در فشار ۰/۲ مگاپاسکال این روند در زمان ۲۰۰ میلی ثانیه رخ می‌دهد [۲۵].



شکل ۲-۱۱: فرآیند انتشار شعله مخلوط متان و هوا تحت فشارهای مختلف اولیه [۲۵].

(د) تاثیر دمای اولیه

داجر و همکاران [۲۶] با آزمون‌های تجربی، اثر دمای اولیه را بر سرعت شعله سه مخلوط سوخت و هوای

هیدروکربنی را بررسی کردند و نشان دادند سرعت شعله با دمای اولیه ارتباط نمایی دارد.

$$S_L \propto T_o^m \quad (۲-۱۱)$$

ضریب m در محدوده ۱/۵ تا ۲ قرار می‌گیرد.

۲-۴-۳- روش‌های تجربی تعیین سرعت شعله آرام

همانطور که قبلاً اشاره شد، سرعت شعله آرام را می‌توان به عنوان سرعتی تعریف کرد که در آن گازهای نسوخته از طریق موج احتراق در جهت عادی به سطح موج حرکت می‌کنند. در شرایط ایده آل مانند یک صفحه بی‌نهایت، شرایط نظری ارائه شده در بالا را می‌توان بدون ابهام برای تعیین سرعت شعله آرام اعمال کرد. با این حال، اندازه‌گیری سرعت سوختن در شعله‌های آرام اغلب تحت تأثیر اعوجاج سطح شعله مربوط به اثرات کشش، و همچنین آدیاباتیک بودن فرآیند است. از آنجایی که دستیابی به یک شعله مسطح و آدیاباتیک در یک میدان سرعت یکنواخت غیرممکن است، چندین روش تجربی از قبیل شعله‌های کروی منبسط شونده^۱، شعله‌های ضد جریان^۲ و دیوار جت^۳، شعله‌های مسطح و تک بعدی^۴ (روش شار حرارتی) و شعله‌های مخروطی^۵ در گذشته برای کاهش تأثیر این اغتشاش‌ها بر روی شعله یا کم کردن تأثیر آن‌ها بر سرعت اندازه‌گیری شعله توسعه یافته و مورد استفاده قرار گرفته است.

انتخاب یک روش مناسب برای اندازه‌گیری سرعت شعله آرام عمدتاً به محدوده سرعت سوختن و شرایط عملیاتی آزمایشی (فشار، دما، نسبت هم‌ارزی و ترکیب سوخت) بستگی دارد. خلاصه‌ای از این روش‌ها به شرح ذیل می‌باشد [۲۰]:

الف) روش شعله کروی منبسط شونده

در این روش، از یک محفظه کروی با مخلوط هوا و سوخت گازی ساکن استفاده شده است. این مخلوط در مرکز محفظه توسط الکترودهای نازک مشتعل می‌شود، سپس یک شعله کروی در حال گسترش در جهت بیرون تولید می‌گردد. در بیشتر محفظه‌های کروی برای تجسم انتشار شعله از روش شیلیرین^۶ یا تجسم سایه استفاده شده است و تکامل زمانی شعاع شعله ثبت می‌شود که منجر به تعیین سرعت انتشار گازهای سوخته به عنوان

^۱- spherically expanding flames

^۲- counter-flow

^۳- jet-wall stagnation flames

^۴- flat and one-dimensional flames

^۵- conical flames

^۶- Schlieren

تابعی از کشش شعله می‌شود. سپس سرعت شعله آرام کشیده نشده از این سرعت استنباط می‌شود که با برون یابی خطی یا غیرخطی به دست می‌آید و با نسبت چگالی گاز سوخته به نسوخته مجدداً مقیاس می‌شود [۲۷] و [۲۸]. این روش شبه آدیاباتیک است و برای محیط‌های فشار بالا (تا ۵ مگاپاسکال [۲۹]) سازگار است. معایب آن شامل اعوجاج احتمالی سطح شعله به دلیل اثرات شناوری (به ویژه برای شعله‌های آتش سوزی با سرعت کم)، تأثیر فرآیند اشتعال (الکترودها، تلفات حرارتی و رسوب انرژی)، نیاز به استفاده از برون یابی خطی یا غیرخطی است. موضوع دیگری که اغلب در استخراج سرعت شعله نادیده گرفته می‌شود، عادی سازی سرعت با استفاده از چگالی‌های قبل و بعد از جبهه شعله است. معمولاً نسبت این چگالی‌ها با فرض اینکه شعله در یک محیط آدیاباتیک انتشار می‌یابد محاسبه می‌شود. با این حال، اعتبار این فرض هرگز بررسی نشده است. بنابراین برای تطبیق نتایج متناقض به دست آمده با استفاده از شعله‌های کروی تجزیه و تحلیل بیشتری مورد نیاز است. محدودیت دیگر دشواری در اندازه گیری سرعت شعله در دمای پیش گرمایش نسبتاً بالا است. در دماهای بالا، زمان ماندن لازم برای اطمینان از عدم حرکت واکنش دهنده‌ها در داخل ظرف بمب می‌تواند منجر به اکسیداسیون خودکار واکنش دهنده‌ها در داخل ظرف شود که به طور قابل توجهی بر دقت اندازه گیری تأثیر می‌گذارد [۳۰].

ب) روش ضد جریان و دیوار جت

روش‌های ضد جریان و دیوار جت شامل میدان‌های جریان ثابت یک شعله آرام یک‌بعدی است [۳۱]. میدان جریان راکد با برخورد دو جریان از پیش مخلوط شده یکسان به یکدیگر یا با برخورد یک جریان از پیش مخلوط بر روی یک دیوار جامد ایجاد می‌شود. با استفاده از روش تشخیص لیزر LDV یا PIV، سرعت جریان اندازه گیری شده و کشش مربوطه استنتاج می‌شود. سپس با انتخاب سرعت مناسب قبل از جبهه شعله، می‌توان همبستگی بین این سرعت و کشش را ارزیابی کرد. از مزایای این روش، آدیاباتیک و پایدار بودن شعله‌های ساکن می‌باشد و اجرای تشخیص لیزر را آسان می‌کند. اثرات انحنای حذف شده و کرنش آیرودینامیکی به خوبی قابل کنترل است. علاوه بر این، گازهای تازه را می‌توان قبل از تغذیه مشعل پیش گرم کرد و مشعل را می‌توان در تاسیسات

فشار بالا برای اندازه گیری سرعت شعله آرام قرار داد [۳۲]. این روش‌ها برای مخلوط‌های واکنشی با سرعت‌های شعله بالا (معمولاً بیش از ۱ متر بر ثانیه) سازگار نیستند [۳۲].

ج) روش شعله مسطح و شار حرارتی

این روش در ابتدا توسط بوت‌ا و اسپالدینگ (۱۹۵۴) [۳۳] معرفی شد. در انجام این کار، یک شعله مسطح پیش مخلوط از طریق اتلاف حرارت به سطح مشعل مخلوط تازه در آن تزریق می‌شود. سپس شعله تنها در محدوده‌ای که اتلاف حرارتی آن صفر است در زمانی که مشعل ناپایدار می‌شود، آدیاباتیک می‌گردد. سپس از تغییرات نرخ تلفات حرارتی برای تعیین آن استفاده می‌شود. در این روش شعله مسطح بر روی صفحه برنجی سوراخ دار گرم شده ساکن می‌شود. سپس اتلاف حرارت مورد نیاز برای تثبیت شعله را می‌توان با شار حرارتی همرفتی از سطح مشعل به جلوی شعله متعادل کرد [۳۴ و ۳۵]. یکی از مزایای عمده روش شار حرارتی، کشش تقریباً صفر شعله است و بنابراین نیازی به برون‌یابی کشش نیست. مزیت دیگر این است که شعله نسبت به مشعل مسطح و آدیاباتیک است، بنابراین تعیین سرعت شعله آرام بدون هیچ گونه اصلاحی برای کشش تسهیل می‌شود. همچنین این روش اخیراً برای اندازه گیری در فشارهای تا ۰/۵ مگاپاسکال نیز گسترش یافته است [۳۶]. با این حال، این روش همچنین دارای اشکالاتی است. یک عیب عمده این است که شعله می‌تواند در فشار اتمسفر بسیار نزدیک به سطح مشعل باشد (اما بیشتر در فشارهای بزرگتر) و کاهش احتمالی رادیکال‌ها در سطح مشعل می‌تواند بر شیمی شعله تأثیر بگذارد. موضوع دیگر محدوده سرعت شعله آرام است که باید بررسی شود. فقط شعله‌هایی با سرعت شعله آرام تا ۴۰ تا ۶۰ سانتی متر بر ثانیه قابل تجزیه و تحلیل هستند. بالاتر از آن، سطح شعله مقداری اعوجاج ناشی از وجود صفحه مشعل سوراخ شده را نشان می‌دهد که از دقت در سرعت‌های سوختن آرام جلوگیری می‌کند [۳۲ و ۳۷]. مشکلاتی در تثبیت شعله در فشارهای بالا به دلیل سلولی بودن نیز ممکن است رخ دهد. در نهایت، آخرین اشکال عمده این روش این است که سرعت شعله آرام با برون‌یابی تعیین می‌شود.

(د) روش شعله مخروطی (روش بونزن)

در روش بونزن از یک شعله مخروطی دوبعدی یا متقارن محوری استفاده می‌شود که به ترتیب روی لبه یک نازل کانتور یا یک مشعل تثبیت شده است. در این روش یک جریان پایدار از یک مخلوط قابل احتراق مورد نیاز است. مشعل را می‌توان برای مطالعه وابستگی به دما از قبل گرم کرد و در یک محفظه فشار بالا برای اندازه‌گیری سرعت سوختن آرام در شرایط مربوط به موتورهای احتراق واقعی قرار داد. در این روش برای ثبت شعله می‌توان از تکنیک‌های مختلف تصویربرداری مانند شیلیرین، شادوگراف، PIV و PLIF استفاده کرد. بر خلاف روش‌های دیگر، روش مشعل بونزن برای اندازه‌گیری سرعت سوزاندن در طیف وسیعی از سرعت‌ها به خوبی سازگار است. مانند روش‌های دیگر، روش بونزن محدودیت‌هایی را ارائه می‌دهد [۳۸].

۲-۵- شعله آشفته

شعله پیش آمیخته و نفوذی می‌تواند به شکل آرام یا آشفته باشد. در اکثر کاربردها از جمله در موتورهای احتراق داخلی، شکل آشفته این شعله‌ها دیده می‌شود. آشفته‌گی شعله متأثر از ناپایداری جبهه شعله یا گردبادهای چرخشی ایجاد شده داخل استوانه موتور است. به علت افزایش سطح ناشی از چروکیدگی^۱ شعله، نرخ سوختن افزایش خواهد یافت [۳۹].

شعله آرام که بعد از یک جرقه ضعیف شکل می‌گیرد به موجب ناپایداری‌های هیدرودینامیکی و احتراق بهم ریخته می‌شود. شعله بهم ریخته شده یا چروک به شعله سلولی تبدیل شده و در نهایت می‌تواند موجب احتراق آشفته شود. علاوه بر این شعله آشفته می‌تواند از برهم کنش جبهه شعله با دیواره‌ها و موانع مسیر جریان و جریان آشفته ورودی حاصل شود. برای انتشار شعله در کانال‌های صاف بدون مانع، اگر جریان ابتدا پس زمینه ساکن داشته باشد، آشفته‌گی بر اثر ناپایداری‌های شعله و اثرات لایه مرزی خواهد بود. یکی از اثرات اصلی آشفته‌گی در احتراق پیش آمیخته این است که آشفته‌گی تا حد زیادی می‌تواند سرعت سوختن را افزایش دهد و افزایش سرعت

^۱ - Wrinkling

شعله به علت آشفته‌گی به شدت به میزان آشفته‌گی یا سرعت نوسان آشفته بستگی دارد [۳۹]. ارتباط بین شعله و آشفته‌گی به طور عمده به مقیاس طولی و زمانی وابسته است. مقیاس طولی شعله می‌تواند با ضخامت شعله آرام (δ_L) مشخص شود در حالی که مقیاس زمانی می‌تواند نسبت ضخامت شعله آرام به سرعت سوختن شعله آرام ($\tau_L = \delta_L / S_L$) تعریف شود. جریان‌های آشفته را می‌توان به عنوان یک سلسله از گردابه‌ها در طیف گسترده از طول و زمان مشخص مشاهده کرد که طول مشخصه و موقعیت محور این گردابه‌ها تصادفی است. گردابه‌های بزرگ به گردابه‌های کوچک‌تر شکسته می‌شوند و این فرآیند ادامه دارد که گردابه‌های کوچک‌تر ایجاد می‌شوند و این سلسله تولید گردابه ادامه دارد تا جایی که نفوذ مولکولی اهمیت پیدا کرده و اتلاف ویسکوزیته اتفاق بیفتد. مقیاس طولی که در آن اتلاف ویسکوزیته رخ بدهد را به عنوان کوچکترین مقیاس جریان آشفته در نظر می‌گیرند. این مقیاس معمولاً با مقیاس طولی کلموگروو^۱ l_k و مقیاس زمانی مربوطه را با τ_k مقیاس زمانی کلموگروو نشان داده می‌شود [۴۰]. اثرات آشفته‌گی در احتراق پیش آمیخته را می‌توان با استفاده از دیاگرام بورگی^۲ در شکل ۱۲-۲ توصیف کرد. محور عمودی سرعت بی بعد شده u'/S_L می‌باشد، که نسبت سرعت نوسانی آشفته به سرعت شعله آرام است. محور افقی نیز مقیاس طولی بی بعد شده l_0/l_L می‌باشد، که نسبت مقیاس انتگرالی آشفته به ضخامت شعله آرام است. همچنین از عددهای بی بعد رینولدز آشفته R_T ، کارلوویتز^۳ K_a و دامکوهلر^۴ D_a استفاده شده است که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$R_T = [\rho u' l_0 / \mu]^2 \quad (۱۲-۲)$$

$$K_a = \tau_L / \tau_k \quad (۱۳-۲)$$

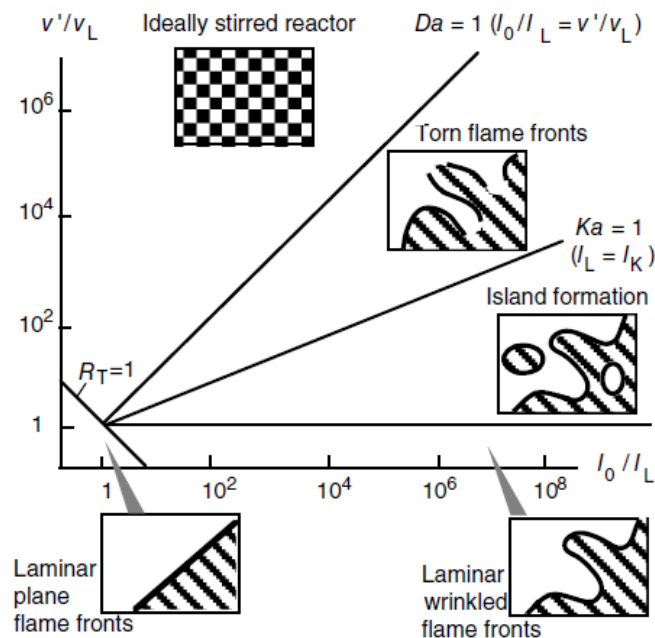
$$D_a = \tau_0 / \tau_L \quad (۱۴-۲)$$

^۱ Kolmogorov

^۲ Borghi

^۳ Karlovitz

^۴ Damkohler



شکل ۲-۱: نمودار بورگی برای الگوی های احتراق [۴۰]

خط $R_T = 1$ احتراق را به منطقه آرام و آشفته تقسیم کرده است. در منطقه ای که $u' < S_L$ سرعت نوسانی کوچکتر از سرعت شعله می باشد، بنابراین پیشرفت آشفته گی آهسته تر از شعله بوده و تنها می تواند جبهه شعله را چین دار کند. اگر $u' > S_L$ & $K_a < 1$ ، ضخامت شعله کوچکتر از مقیاس طولی کلموگروو گردابه بوده و شدت آشفته گی بزرگتر از سرعت شعله آرام می باشد. چین و چروک های شعله در این نوع آشفته گی باعث ایجاد تکه های جزیره ای شکل از مخلوط سوخته و نسوخته گاز می شود. پیتز^۱ [۴۱] این ناحیه را به عنوان ناحی شعله وری چین دار^۲ معرفی کرد. اگر $D_a > 1$ & $K_a > 1$ ، مقیاس طولی کلموگروو گردابه کوچکتر از ضخامت شعله است. در این حالت شعله آرام نمی تواند پایدار باشد چون کوچکترین گردابه ها ساختار داخلی شعله را تغییر می دهند. پدیده خاموشی محلی شعله وقتی که گردابه ها شعله از بین می روند، رخ می دهد. این ناحیه شعله تورن^۳

^۱ Peter

^۲ Wrinkled flamelet zone

^۳ Torn or distributed reaction zone

یا ناحیه واکنش توزیع شده^۱ نامیده می‌شود. در ناحیه آخر $D_a < 1$ سرعت واکنش‌های شیمیایی در مقابل سرعت آشفستگی آهسته‌تر می‌باشد [۴۲].

۲-۶- ناپایداری شعله

در انتشار شعله‌های پیش آمیخته عواملی مانند موج‌های فشاری، اتلاف حرارتی، شرایط مرزی، موانع موجود مسیر جریان، و غیره بر انتشار شعله تأثیر می‌گذارند. چندین نوع ناپایداری شعله در این مورد وجود دارد که شامل ناپایداری هیدرودینامیکی^۲ [۴۳]، ناپایداری نفوذی-حرارتی^۳ [۴۴]، ناپایداری رایلی-تیلور^۴، ناپایداری کلون-هلمهلتز^۵ [۴۵] می‌باشد.

بارر و ویلیام [۴۳] بیان می‌کنند که ناپایداری‌های احتراق نتیجه دو عامل تأثیرات خارجی و شرایط داخلی شعله است. نمونه‌هایی از تأثیرات خارجی که ممکن است موجب ناپایداری شعله شوند، امواج صوتی، امواج شوک و ایجاد الگوهای جریان در محفظه احتراق که شامل شرایط دینامیک سیال می‌باشد. ناپایداری‌هایی که بدون اثرات خارجی در شعله رخ می‌دهند نتیجه عدم ثبات ذاتی واکنش دهنده‌ها می‌باشد.

ناپایداری کلون-هلمهلتز مربوط به نیروهای برشی ایجاد شده توسط اختلاف سرعت‌های سیال است. یکی از ساده‌ترین حالت‌هایی که این ناپایداری می‌تواند رخ بدهد در سطح مشترک دو سیال مخلوط نشدنی با جریان‌های موازی بر روی هم و سرعت‌های متفاوت است [۴۵].

¹ Distributed reaction zone

² Darrieus-Landau

³ Diffusive-Thermal

⁴ Rayleigh- Taylor

⁵ Kelvin- Helmholtz

۷-۲- الگوهای احتراق در انتشار شعله داخل یک محفظه

همان طور که در شکل (۲-۱۳) نشان داده شده، الگوی جریان احتراق به پنج مرحله یا الگوی متمایز تقسیم می گردد که شامل: (۱) جرقه ضعیف (۲) شعله آرام (۳) شعله آرام چین دار^۱ (۴) شعله آشفته (۵) انفجار^۲ [۴۲].



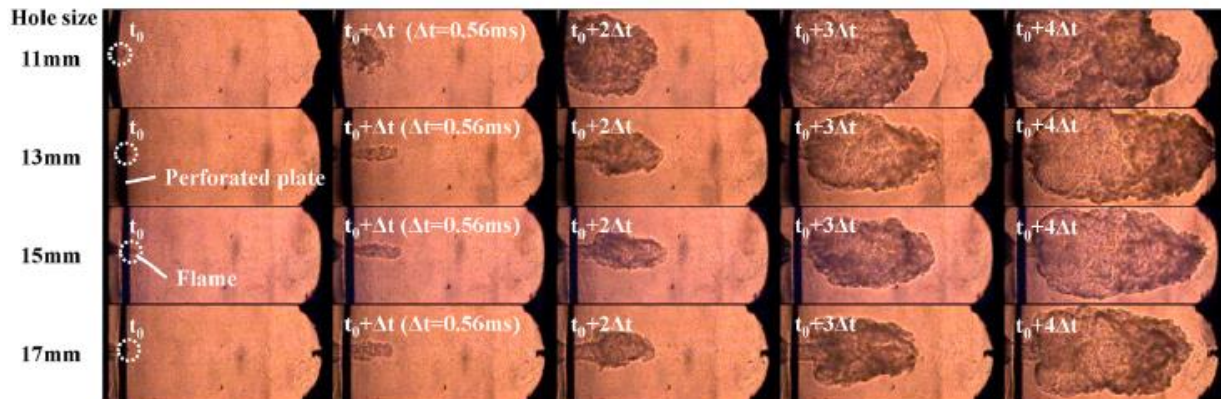
شکل ۲-۱۳: شماتیک الگوهای امکان پذیر برای انتشار شعله پیش آمیخته در یک محفظه [۴۲]

روند انتشار شعله یک مخلوط هوا و هیدروژن با حضور صفحات سوراخ دار در شکل (۲-۱۴) نشان داده شده است. فرآیند به این صورت است که ابتدا با ایجاد یک جرقه ضعیف شعله آرام با سطحی هموار شکل می گیرد در این مرحله تغییرات شعله تابع سرعت شعله آرام و نسبت انبساط می باشد. با انتشار شعله سطح آن نیز به سرعت افزایش می یابد. شعله در واقع یک ناپیوستگی در چگالی و به طور ذاتی مستعد به ناپایداری است. در طی توسعه شعله و وجود ناپایداری ها، چین چروک در جبهه شعله ایجاد شده که باعث افزایش سطح شعله و در نتیجه تسریع سرعت سوختن می شود. شتاب شعله بیش تر به واسطه آشفته گی رخ داده و رشد می کند. آشفته گی شعله به وسیله

¹ Jet Flame

² Detonation

اثرات دیواره شامل جریان برشی، اثرات زبری، موجود موانع در طول مسیر شعله، ناپایداری‌های شعله و برخورد موج‌های فشاری می‌تواند ایجاد شود [۴۶]. در برخی از مواقع برخورد شعله به موانع موجود در مسیر باعث کاهش فشار و سرعت شعله و در نهایت منجر به خاموشی شعله می‌شود. خاموشی شعله در بسیاری از صنایع به جهت افزایش ایمنی از اهمیت فراوانی برخوردار است. در ادامه به بررسی خاموشی شعله پرداخته خواهد شد.



شکل ۲-۱۴. انتشار شعله در پشت صفحات سوراخ دار با اندازه سوراخ های مختلف در فشار اولیه ۵ بار [۴۶]

۲-۸ - خاموشی شعله

محیط‌های متخلخل نقش به سزایی در خاموشی شعله دارند. فوم‌های سرامیکی، فویل‌های فلزی، شانه‌ها و غیره را می‌توان به عنوان محیط متخلخل استفاده کرد که در نتیجه خواص مختلفی از ماتریس متخلخل ایجاد می‌شود. تخلخل (ε) (کسر خالی) محیط متخلخل (PM) به صورت زیر تعریف شده است [۴۷]:

$$\varepsilon = \frac{\text{حجم آزاد منافذ}}{\text{حجم کل}} \quad (2-16)$$

مهمترین پارامترهای مورد بررسی در خاموشی شعله عبارتند از [۴۸]:

✓ فاصله خاموشی

✓ قطر خاموشی

✓ الگوی خاموشی

هنگامی که شعله به یک دیواره جامد برخورد می‌کند، واکنش شیمیایی آن متوقف می‌شود و فاصله معینی از دیوار و لایه‌ای از سوخت خالی باقی می‌ماند. این فاصله، فاصله خاموشی شعله^۱ نامیده می‌شود. ضخامت فاصله خاموشی در یک موتور را می‌توان با تبدیل حجم هیدروکربن‌های ساطع شده به حجم سوخت نسوخته معادل تخمین زد. و مقدار آن حدود ۳۰ تا ۱۰۰ میکرومتر است، که همان فواصل خاموشی به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام شده در زمینه خاموشی شعله است [۴۸].

ویلیامز [۴۹] فاصله خاموشی شعله (d_Q) را برای شعله‌ای که در یک مخلوط ساکن منتشر می‌شود، به عنوان تابعی از ضخامت انتشار شعله ($d\delta$)، یا به عنوان تابعی از سرعت سوختن آرام (S_L)، مطابق فرمول (۲-۱۷) بیان می‌کند:

$$d_Q = P_e \times \delta = p_e \times \frac{\lambda}{c_p \rho S_L} \quad (2-17)$$

که در آن Pe عدد پکلت^۲ در زمان خاموشی شعله، λ رسانایی حرارتی، C_p گرمای ویژه در فشار ثابت و ρ چگالی گازهای نسوخته است. این مدل تطابق خوبی با نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای شعله در حال انتشار در محیط‌های آرام ارائه می‌دهد که توسط موانع خاموش شده است [۴۹].

فواصل خاموشی به دست آمده برای شعله‌های گاز متان خالص در محدوده ۳-۴ میلی‌متر و برای مخلوط متان و هوا در شرایط استوکیومتری در یک کانال مستطیلی حدود ۲ تا ۲/۵ میلی‌متر گزارش شده است [۵۰].

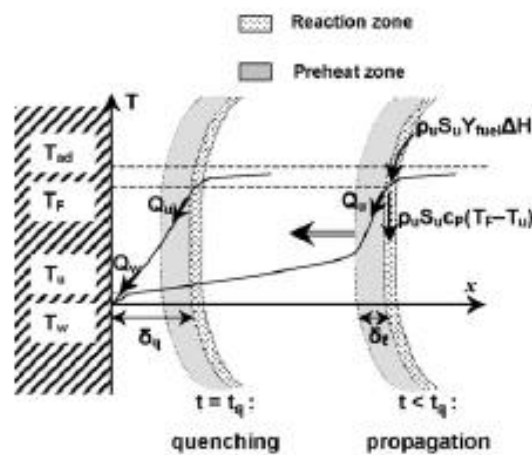
^۱- Quenching Distance

^۲- Péclet

قطرهای خاموشی اندازه گیری شده برای شعله مخلوط متان- هوا در شرایط استوکیومتری ۲ تا ۳/۲ میلیمتر است [۵۰].

به طور کلی دو نوع الگوی خاموشی را می توان مورد بررسی قرار داد [۵۰]:

✓ خاموشی مستقیم یا رودررو (HOQ^1): اگر شعله از پیش مخلوط شده به سمت دیوار پخش شود، HOQ مشاهده می شود. شعله در فاصله معینی (y_Q) از دیوار (از مرتبه ضخامت شعله) متوقف می شود و حداکثر شار دیواره Ω_ϕ^p وقتی شعله خاموش می شود یک سوم توان کل شعله است. در شکل (۲-۱۵) این مدل خاموشی شبیه سازی شده است.

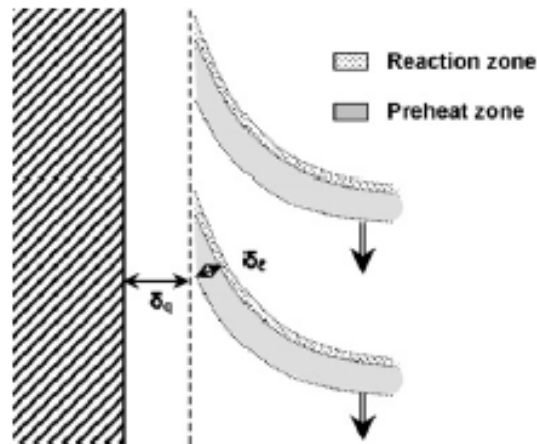


شکل ۲-۱۵. شبیه سازی مدل خاموشی Head On [۵۰]

✓ خاموشی جانبی به موازات دیواره (SWQ^2): اگر شعله از پیش مخلوط شده در امتداد دیوار پخش شود، فاصله y_Q بین دیوار و شعله بزرگتر از HOQ است و حداکثر شار دیواره کمی کمتر است. در شکل (۲-۱۶) این مدل خاموشی شبیه سازی شده است.

¹- Head On Quenching

²- Side Wall Quenching



شکل ۲-۱۶. شبیه سازی مدل خاموشی SideWall [۵۰]

بدین ترتیب در مجاورت موانع جامد به دو دلیل خاموشی شعله اتفاق خواهد افتاد:

❖ اتلاف حرارت و جذب گرما توسط موانع جامد و تخلخل

❖ مرگ و میر رادیکال‌ها و کم شدن رادیکال‌ها

۲-۹- جمع‌بندی

در صنایع مختلف، انفجار گاز متان جزء رویدادها و خطرات مهم به شمار می‌آید. در این فصل خلاصه‌ای از مکانیزم احتراق گاز متان، انواع شعله و روش‌های ارزیابی سرعت شعله و عوامل مؤثر بر آن معرفی شدند. همچنین مکانیزم خاموشی شعله نیز مورد بررسی قرار گرفت. به لحاظ اهمیت موضوع انفجار گاز متان و تأثیر آن در ایمنی و صنایع مختلف از قبیل موتورهای احتراق داخلی، معادن، پتروشیمی و غیره لازم است شناخت دقیقی از رویداد احتراق گاز متان کسب کنیم. به این منظور در فصل بعدی مطالعات انجام شده در زمینه احتراق گازها و کاربرد موانع متخلخل و صفحات سوراخ دار مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل سوم

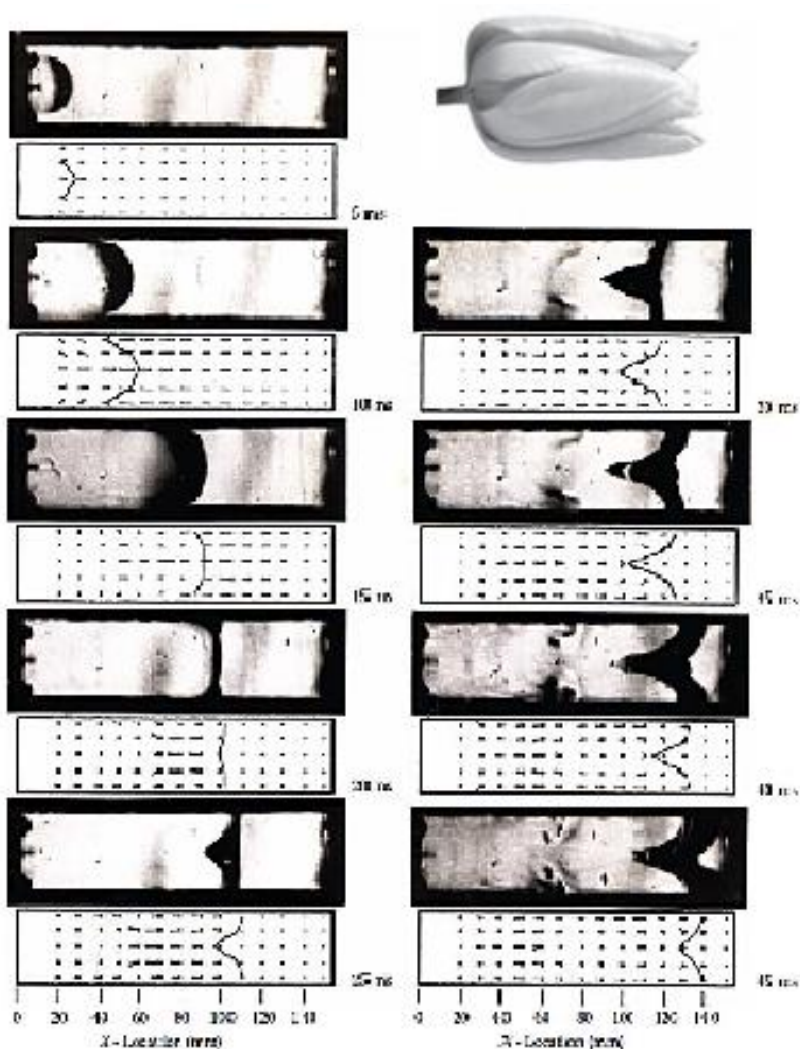
سابقه علمی موضوع

۳-۱- مقدمه

همانطور که در فصل قبل به آن اشاره شد، انفجارهای گازی به گروهی از فرآیندهای احتراقی پیش آمیخته اطلاق می‌شوند که در آن‌ها موج شعله اولیه در اثر برخورد با محیط پیرامون (نظیر موانع و صفحات صلب) به سرعت شتاب گرفته و حرارت نسبتاً زیادی را تولید می‌کند. علاوه بر این موج شوک توسعه یافته توسط انفجارهای گازی در سطوح باعث می‌شود که شعله به وجود آید و به این ترتیب فشار و دمای نهایی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد و منجر به ویرانی و آسیب‌های گسترده می‌شود. شناخت ساز و کاری که باعث کاهش سطح فشار انفجار، کاهش خطر انفجار و افزایش ایمنی در صنایع نفت و گاز، معادن و هر جایی که در معرض نشتی مواد قابل احتراق قرار دارد، موضوع مطالعات مختلفی قرار گرفته است [۵۱].

در بسیاری از کاربردهای صنعتی که موانع و صفحات صلب در مسیر شعله قرار دارند، تماس جریان گاز با موانع باعث افزایش آشفته‌گی سطح جریان، افزایش سطح شعله و سرعت شعله می‌شود. با توجه به مطالب فوق، واضح است که بررسی دقیق شعله‌های پیش مخلوط آشفته در محفظه‌های بسته و در حضور موانع، به عنوان یک مسئله چالش برانگیز به ویژه در بیان دقیق سرعت شعله و ساختار ناحیه واکنش می‌شود [۵۲]. اگرچه بحث تأثیر موانع و صفحات صلب بر شتاب گیری شعله و فشار حاصل از انفجار در مقیاس‌های بزرگ به اوایل دهه ۱۸۰۰ میلادی بازمی‌گردد، اما با پیشرفت وسایل اندازه‌گیری آزمایشگاهی در دهه‌های اخیر مطالعات تجربی مختلفی برای بررسی اثر موانع بر روی ساختار شعله و فشار بیشینه حاصل از انفجارهای گازی در مقیاس آزمایشگاهی انجام

گرفته است [۵۲]. مالارد و لی شاتلیه^۱ اولین تحقیق آزمایشگاهی بر روی انتشار شعله پیش آمیخته در یک محفظه را در سال ۱۸۸۳ انجام دادند. اولین تصویر از شکل انتشار جبهه شعله توسط الیس در سال ۱۹۲۸ چاپ شده است. او مشاهده کرد که شکل شعله برای محفظه بسته با نسبت طول به قطر بزرگتر از ۲ به طور ناگهانی تغییر می‌کند و به شکل هلالی در می‌آید. این پدیده هلالی شدن در سال ۱۹۵۹ توسط سالاماندر و همکاران شعله لاله گون^۲ (شکل ۱-۳) نام گذاری کرده اند [۵۳].



شکل ۱-۳: انتشار شعله لاله‌گون متان و هوا در یک محفظه بسته مستطیلی [۵۴].

^۱- Mallard and Le Chatelier

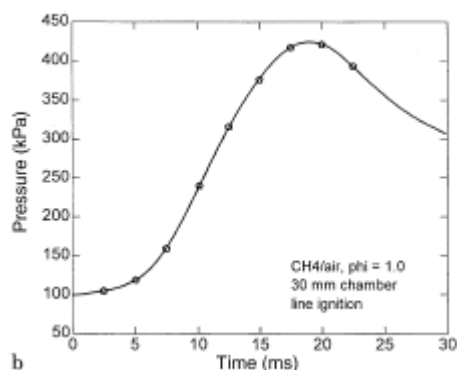
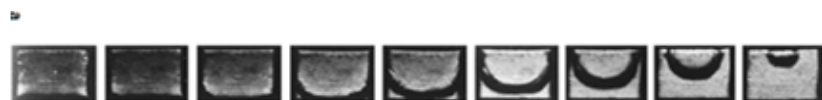
^۲- Tulip flame

۳-۲- مطالعات انجام شده در زمینه بررسی انفجارهای گازی در محفظه بسته

پژوهش‌های تجربی و همچنین مطالعات عددی [۵۵-۵۹] مختلفی در زمینه ارزیابی خطر انفجار گازی در محفظه‌های بسته انجام شده است که در ادامه به بررسی برخی از این مطالعات اشاره شده است.

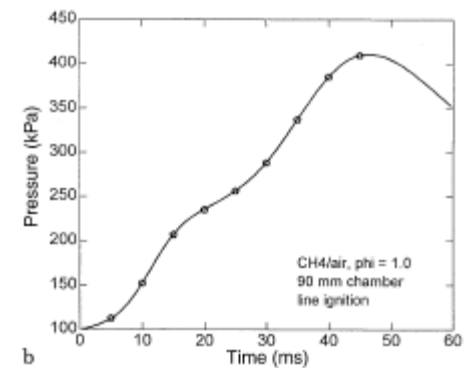
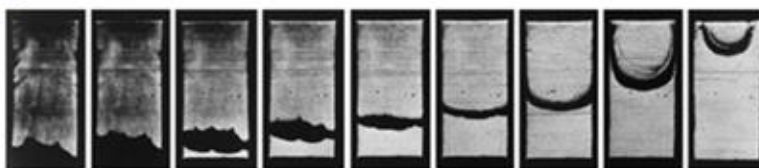
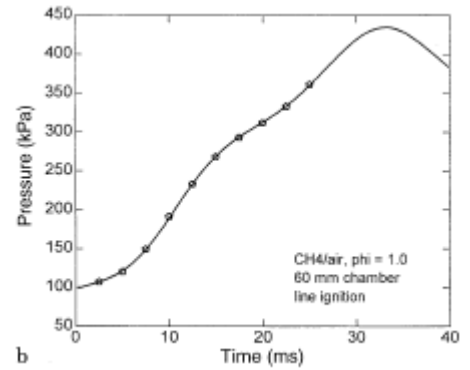
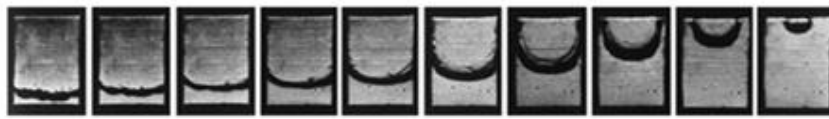
۳-۲-۱- دان-رنکین و ساویر^۱ ۱۹۹۸ [۵۴]

دان-رنکین و ساویر به طور آزمایشگاهی به بررسی تغییر شکل انتشار جبهه شعله در کانال‌های بسته پرداخته‌اند. مقطع محفظه مربعی به طول ۳۸ میلی‌متر بوده و پارامترهای مورد مطالعه آن‌ها تأثیر طول محفظه با در نظر گرفتن محدوده ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۳۰، ۱۵۰ میلی‌متر برای مخلوط استوکیومتری متان-هوا و برای طول ۱۵۰ میلی‌متر برای مخلوط اتیلن-هوا با نسبت‌های هم ارزی ۰/۶، ۰/۷، ۰/۹ و ۱/۱ بوده است. جهت عکس برداری از تکنیک شیلیرین استفاده شده است و جنس دیواره محفظه از جنس پلکسی گلاس استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری تغییرات فشار از مبدل فشار استفاده شده است و هر ۲ میلی ثانیه سیگنال‌های خروجی به اسیلوسکوپ^۲ منتقل و ذخیره می‌شوند. نمونه‌ای از نتایج عکس برداری و تغییرات فشار داخل مخزن، برای مخلوط استوکیومتری متان-هوا در شکل‌های (۳-۲) و (۳-۳) آورده شده است.



¹ Dunn-Rankin and Sawye

² Oscilloscope



شکل ۳-۲. نتایج حاصل از عکس برداری و تغییرات فشار داخل محفظه بسته برای طول های $L = 30, 60, 90 \text{ mm}$ و مخلوط استوکیومتری متان- هوا [۵۴]

نتایج آزمایش این محققان به شرح ذیل است:

(۱) شروع تشکیل گل لاله با کاهش سریع سطح شعله به همراه فشرده شدن شعله به دیواره‌های محفظه احتراق همراه است.

(۲) کاهش بیشتر سطح شعله باعث ایجاد گل لاله برجسته‌تری می‌شود و شکل گیری گل لاله نسبت به ترکیب مخلوط حساس است.

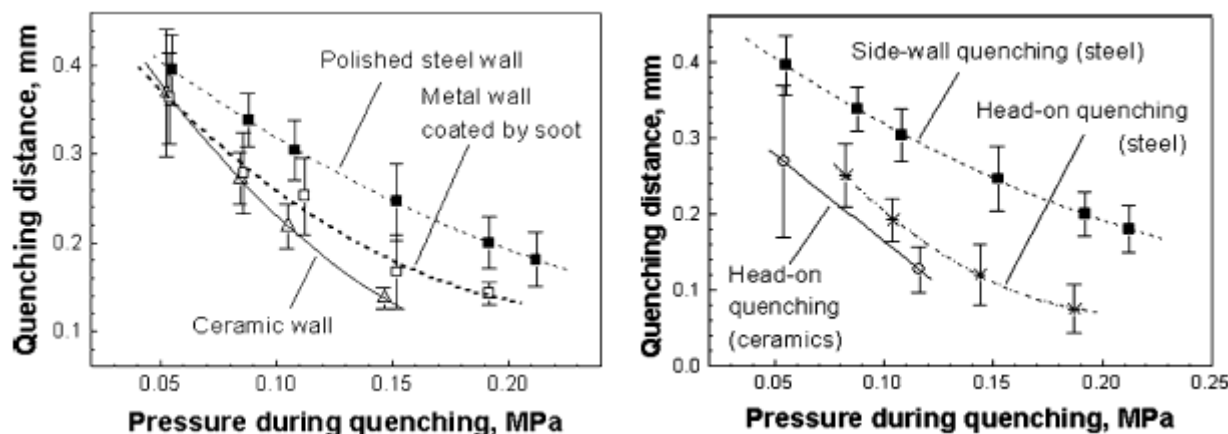
(۳) در محفظه‌های کوتاه گل لاله کمتر ایجاد می‌شود و در مواردی حتی ایجاد نمی‌شود.

(۴) زمان شروع گل لاله به نسبت هم‌ارزی (یا به طور کلی به سرعت شعله آرام) وابسته است و تقریباً از طول محفظه برای یک مقطع عرضی از یک حداقل طول به بعد، مستقل است.

۵) شعله گل لاله دارای تقارن محوری است (به جز در گوشه‌ها که در آن شکل شعله نامشخص است) حتی زمانی که شعله با منبعی که تقارن محوری ندارد آغاز شود.

۳-۲-۲- بلنیو^۱ و همکاران ۲۰۰۳ [۶۰]:

در این مطالعه فاصله خاموشی مخلوط متان و هوا در یک محفظه مستطیلی مورد بررسی قرار گرفته است. در محفظه از موانعی از جنس فولاد صیقلی و فولاد پوشش داده شده با دوده و سرامیک استفاده شده است. شعله با یک مانع مستطیلی که در پایین محفظه احتراق قرار دارد در تعامل است. فاصله خاموشی در نزدیکی بالای مانع و در مجاورت دیواره جانبی آن با استفاده از عکاسی مستقیم از موقعیت شعله در نزدیکی سطح خاموش کننده اندازه گیری می‌شود. مطابق شکل ۳-۳ برای موانع سرامیکی، فاصله خاموشی دیوار جانبی (Sidewall) کمتر از فولاد صیقلی در محدوده فشار ۰/۰۵ - ۰/۱۵ مگاپاسکال است. فاصله خاموشی سربه سر (Head-on) هنگام حضور فولاد صیقلی، ۱/۴ - ۲/۵ برابر کمتر از خاموشی دیواره جانبی (Sidewall) در محدوده فشار ۰/۰۸ - ۰/۱۹ مگاپاسکال است.



شکل ۳-۳: انواع فاصله خاموشی در حضور موانع با جنس مختلف [۶۰]

¹- Bellenoue

۳-۲-۳- کورزاوین^۱ و همکاران ۲۰۰۵ [۶۱]:

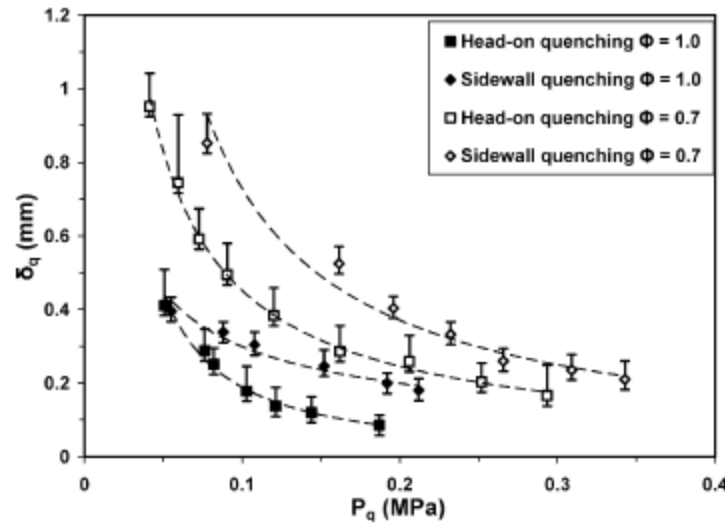
در این مطالعه انتشار شعله های پروپان-هوا در یک محیط با تخلخل بالا با حضور مخلوط سوخت اکسیژن و نیتروژن به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. طبق نتایج این تحقیق تغییر در غلظت نیتروژن یا اکسیژن (در فاز گاز) منجر به تغییر قابل توجهی در سرعت انتشار شعله نسبت به سرعت سوختن آرام می شود. با افزودن نیتروژن، افزایش سرعت شعله با فشار اولیه کمتر می شود و دامنه غلظت انتشار شعله باریکتر می شود. در طول انتشار شعله، عدد پکلت به نسبت سوخت به اکسید کننده و محتوای نیتروژن در مخلوط بستگی دارد و از سرعت شعله آرام محاسبه می شود و در مخلوط اولیه ثابت نیست.

۳-۲-۴- بوست^۲ و همکاران ۲۰۰۷ [۶۲]:

در این تحقیق احتراق مخلوط متان و هوا در یک ظرف حجم ثابت مورد بررسی قرار گرفته است و مدلی جهت محاسبه فاصله خاموشی شعله ارائه شده است. این مدل ساده شده از تماس شعله آرام با دیواره به دست آمده است. این امکان ارزیابی فاصله خاموشی شعله از شار حرارتی دیواره و خواص مخلوط را فراهم می کند. مزیت مهم این فرمول عدم وجود ضریب تجربی است. برای ارزیابی قابلیت اطمینان آن، نتایج محاسبه شده با این معادله با داده های تجربی مربوط به تماس شعله آرام با دیواره مقایسه شده اند. برای این منظور، فاصله خاموشی شعله در هر دو حالت خاموشی رو در رو و دیواره جانبی اندازه گیری شده است (شکل ۳-۴). این معادله در محدوده فشار ۰/۰۵ تا ۰/۳۵ مگاپاسکال در مخلوط های استوکیومتری تأیید شده است.

^۱- Korzavin

^۲- Boust



شکل ۳-۴: انواع فاصله خاموشی ثبت شده در فشار و نسبت هم ارزی مختلف [۶۲]

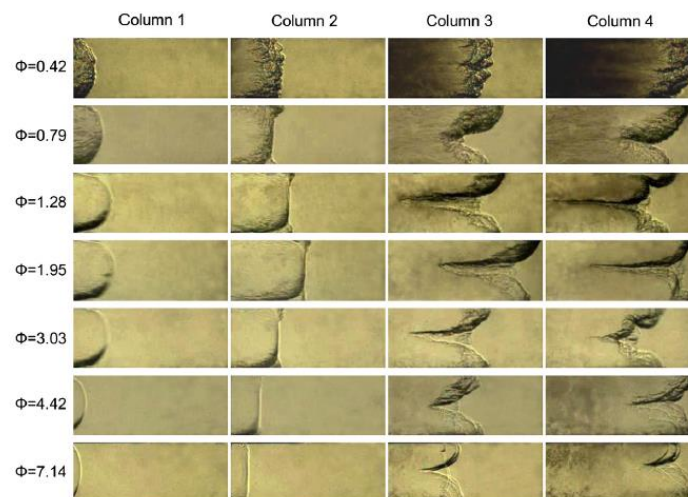
۳-۲-۵- تنگ^۱ و همکاران ۲۰۰۹ [۶۳]:

در این مطالعه انتشار شعله‌های آرام مخلوط ذرات آهن در یک محیط سهموی مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌ها با چهار ذرات مختلف با اندازه متوسط در محدوده ۳ تا ۲۷ میلی‌متر انجام شد. پراکندگی ذرات یکنواخت در داخل لوله شیشه‌ای به طول ۷۰ سانتی‌متر ایجاد شد و سپس در انتهای باز از طریق یک سیم گرم شده الکتریکی مشتعل شد. فواصل خاموشی شعله‌های آتش از طریق مجموعه صفحات فولادی با فاصله مساوی نصب شده در لوله‌ها تعیین شد. طبق نتایج این تحقیق، فاصله خاموشی شعله به صورت خطی با اندازه ذرات افزایش می‌یابد به طوری که فاصله خاموشی برای ذرات کمتر از ۳ میکرومتر، کمتر از ۲ میلی‌متر و برای ذرات با اندازه ۲۷ میکرومتر، فاصله خاموشی به ۱۰ میلی‌متر رسیده است. همچنین سرعت شعله در لوله‌های باز با اندازه ذرات گرد و غبار نسبت معکوس دارد.

^۱- Tang

۳-۲-۶- کیائو^۱ و همکاران ۲۰۱۱ [۶۴]

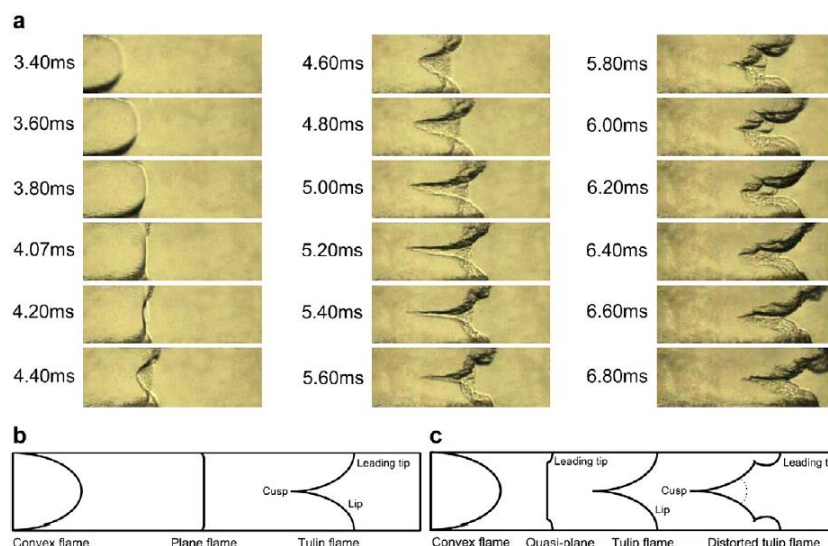
کیائو و همکاران رفتار انتشار شعله هیدروژن-هوا را در محفظه افقی با مقطع مستطیل در دو حالت کاملاً بسته و نیمه باز، با ابعاد $۵۳۰ \times ۸۲ \times ۸۲$ میلی متر را به طور تجربی برای نسبت های هم ارزی مختلف مورد بررسی قرار دادند. جهت عکس برداری از جبهه شعله و مطالعه رفتار آن دو طرف محفظه از جنس شیشه کوارتز طراحی شده و از دوربین با سرعت ۱۵۰۰۰ فریم بر ثانیه استفاده شده همچنین از مبدل فشار پیزوالکتریک جهت ثبت تغییرات فشار داخل مخزن استفاده شده است. تصویر انتشار شعله برای مخلوط هیدروژن-هوا برای نسبت های هم ارزی مختلف در شکل ۳-۵ آورده شده است.



شکل ۳-۵: تصویر جبهه شعله هیدروژن-هوا با نسبت های هم ارزی متفاوت [۶۴]

در شکل (۳-۶) تصویر جبهه شعله هیدروژن-هوا با $\phi = 3.03$ به طور دقیق تر نشان داده شده و شماتیک تشکیل گل لاله کلاسیک و شماتیک حالت بهم ریختگی گل لاله که در ادامه رشد جبهه شعله رخ می دهد به همراه جزئیات آن نشان داده شده است. طبق نتایج این مطالعه مشخص شد که در رنج $0.84 \leq \phi \leq 4.22$ بعد از تشکیل گل لاله بهم ریختگی در آن ایجاد می شود.

¹ - Xiao

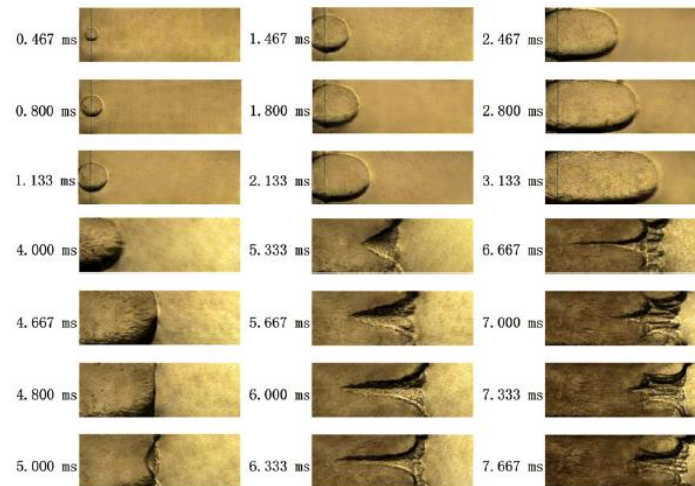


شکل ۳-۶: (a) تصویر جبهه شعله هیدروژن-هوا با $\phi = 3.03$ (b) شماتیک تشکیل گل لاله کلاسیک (c) شماتیک تشکیل گل لاله و بهم ریختگی آن در طی پیشرفت جبهه شعله [۲۸]

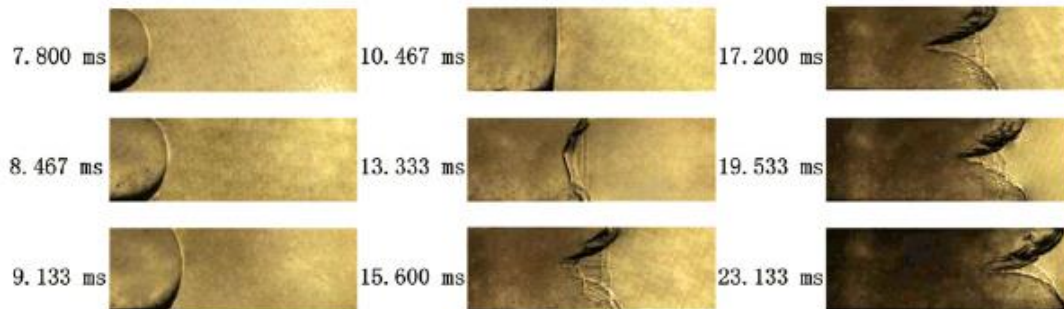
۳-۲-۷- شن^۱ و همکاران ۲۰۱۲ [۶۵]

در این مطالعه رفتار انتشار شعله هیدروژن-هوا در یک محفظه افقی بسته با مقطع مستطیلی با ابعاد $۵۳۰ \times ۸۲ \times ۸۲$ میلی متر به طور تجربی برای نسبت های هم ارزی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش نشان داده شد که الگوهای حرکت شعله و حاشیه های آن در سطح تماس با دیواره به چند بخش با ویژگی های متمایز تقسیم می شود. هم چنین دو نوع شعله لاله گون در رنج های متفاوت نسبت هم ارزی در محفظه مشاهده شد. نتایج آزمایشگاهی در محدوده $\phi = 0.91 - 2.24$ بهترین هم خوانی را با پیش بینی های تئوری دارد. در شکل (۳-۷) و (۳-۸) مراحل رشد شعله برای $\phi = 1.47$ و $\phi = 5.07$ نشان داده شده است. در شکل ۳-۸ تشکیل شعله لاله گون در بازه زمانی $4/8$ تا 6 میلی ثانیه دیده می شود. در حالی که در شکل ۳-۹ زمان تشکیل شعله لاله ای شکل $10/467$ میلی ثانیه می باشد.

¹- Shen



شکل ۳-۷: تصاویر شعله هیدروژن-هوا برای $\phi = 1.47$ [۶۵]



شکل ۳-۸: تصاویر شعله هیدروژن-هوا برای $\phi = 5.07$ [۶۵]

۳-۲-۸- یانگ^۱ و همکاران ۲۰۱۳ [۶۶]

یانگ و همکارانش مکانیزم انتقال حرارت در ماده‌های متخلخل با شبیه سازی‌های عددی و آزمایش‌های تجربی بر روی فرایند احتراق پیش مخلوط متان و هوا را در یک مشعل مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه انتقال حرارت متأثر از نسبت هم‌ارزی و میزان سرعت شعله‌های پیش مخلوط بررسی شد، زیرا این دو پارامتر بر ویژگی‌های ساختاری شعله تاثیر می‌گذارند و مکانیسم انتقال حرارت را تغییر می‌دهند. طبق نتایج این مطالعه:

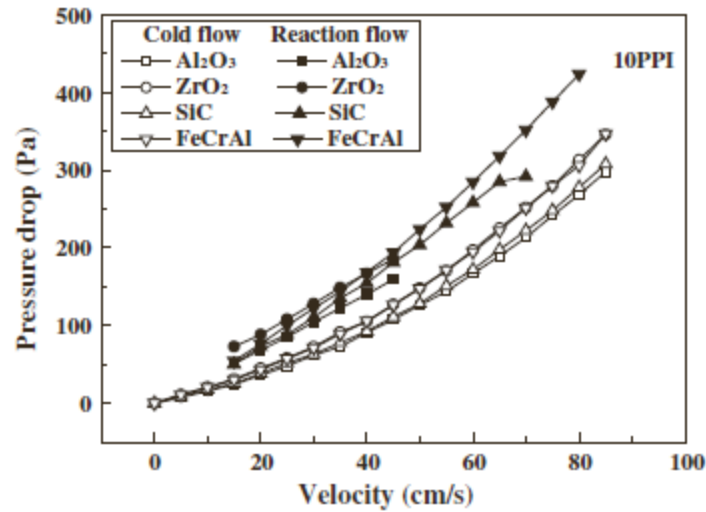
¹ Yang

۱. سرامیک ویژگی‌های انتقال حرارت شعله‌های پیش مخلوط و شکل و رنگ آن‌ها را تغییر می‌دهد. نسبت هم‌ارزی و سرعت مخلوط نیز می‌تواند ظاهر شعله‌های آتش را تحت تاثیر قرار دهد.
۲. دمای شعله پیش مخلوط و سرعت انتشار شعله با افزایش سرعت حرکت گاز افزایش می‌یابد به طوری که سرعت جریان با افزایش نسبت هم‌ارزی زیاد می‌شود.
۳. تغییر ویژگی‌های شعله پیش گرم، باعث افزایش نفوذ پذیری و انتشار گرما و موجب افزایش بی‌ثباتی پخش شعله گردید. هم‌چنین ویژگی‌های پیش گرم شدن شعله‌های آتش در نسبت‌های هم‌ارزی کم، ناچیز بود.
۴. نتایج شبیه سازی عددی نشان می‌دهد که تغییر در نسبت هم‌ارزی باعث تغییر در سرعت حرکت گاز در مخلوط می‌شود.

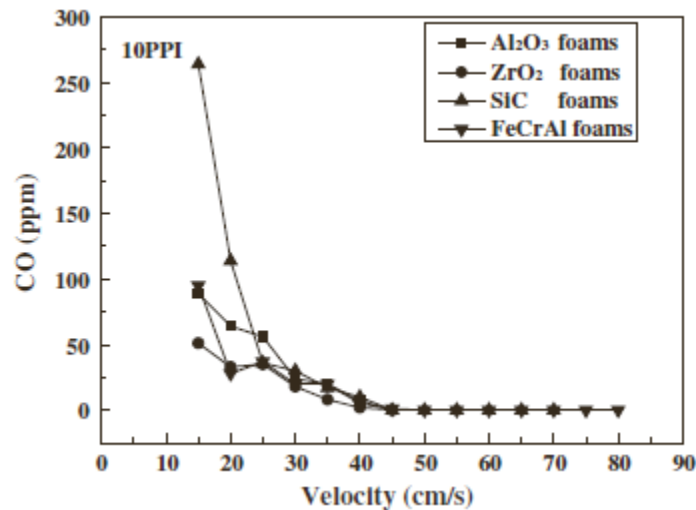
۳-۲-۹- گائو^۱ و همکاران ۲۰۱۳ [۶۷]

گائو و همکارانش احتراق پیش مخلوط متان و هوا را در یک محفظه دو لایه متخلخل با مواد مختلف مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه اثر ۴ نوع ماده متخلخل از قبیل آلومینا (Al_2O_3)، زیرکونیا (ZrO_2)، فولاد حاوی آلومینیوم ($FeCrAl$) و کاربید سیلیسیوم SiC بر رفتار شعله احتراق مخلوط متان و هوا، پایداری شعله، درجه حرارت شعله، افت فشار و انتشار آلاینده‌ها در یک مشعل با قطر داخلی ۵۰ میلی‌متر و طول ۲۰۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. در این مشعل دو لایه متخلخل از جنس آلومینا با قطر ۳ میلی‌متر در بخش بالا و فوم در بخش پایین استفاده شده است. فوم سلولی به عنوان ماده جایگزین برای آلومینا، زیرکونیوم، آهن کروم آلومینیوم می‌باشد. این دستگاه حاوی یک مشعل متخلخل، سیستم تأمین سوخت / هوا و یک سیستم برای دریافت داده است. ضخامت دیوار مشعل با لایه عایق بندی شده با تحمل درجه حرارت بالا به قطر ۲۰ میلی‌متر است. در شکل (۳-۹) نمودار افت فشار و سرعت جریان گاز با فوم‌های مختلف و در شکل (۳-۱۰) نمودار آلاینده‌گی CO برای مواد مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

¹- Gao



شکل ۳-۹: نمودار افت فشار و سرعت جریان گاز برای مواد مختلف فوم. [۶۷]



شکل ۳-۱۰: نمودار آلاینده‌گی CO با سرعت جریان برای مواد مختلف. [۶۷]

نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده به شرح ذیل می‌باشد:

- (۱) حداکثر دمای شعله در حداکثر سرعت شعله اتفاق نمی‌افتد. ترکیب FeCrAl دارای کمترین دمای شعله در سرعت ($S < 40 \text{ cm/s}$) و بالاترین درجه حرارت شعله در سرعت ($S > 60 \text{ cm/s}$) مشاهده شد. اختلاف درجه حرارت شعله در بین ۱۰ PPI، ۲۰ و ۲۵ بسیار ناچیز مشاهده شد ولی دمای شعله کاربید سیلیسیوم ۳۰ PPI در مقایسه با سه ماده دیگر بسیار کم بود.

(۲) کاهش فشار به علت تغییر در تراکم منافذ در ماده‌های متخلخل بسیار محسوس بود.

(۳) عامل بسیار مهم در تشکیل CO درجه حرارت شعله می‌باشد. همچنین آلاینده‌گی HC تحت تأثیر درجه حرارت شعله و زمان ماندگاری سوخت و هوا می‌باشد. مقدار آلاینده‌گی HC برای مواد FeCrAl ، ZrO_2 ، Al_2O_3 تقریباً ثابت بود، غلظت HC ماده متخلخل SiC با افزایش سرعت شعله کاهش می‌یابد. همچنین میزان انتشار NO_x برای هر چهار ماده کمتر از ۳ ppm است در حالی که میزان انتشار HC در فوم SiC با افزایش سرعت جریان کاهش می‌یابد.

۳-۲-۱۰- پالکا^۱ و همکاران ۲۰۱۴ [۶۸]:

در این تحقیق فواصل خاموشی شعله‌های آرام در مخلوط هیبریدی متان-آلومینیوم (۱۶/۳ درصد اکسیژن، ۸/۱ درصد متان و ۷۵/۶ درصد ذرات آلومینیوم) به طور تجربی در غلظت‌های مختلف ذرات آلومینیوم با اندازه متوسط حدود $d_{32} = 5.6$ میکرومتر اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها در یک لوله شیشه‌ای پیرکس با قطر داخلی ۴۸ میلی‌متر انجام شد. مجموعه‌ای از صفحات فلزی با فاصله مساوی موازی در حدود ۵۰ سانتی‌متر از انتهای لوله باز نصب شد و کانال‌های موازی را تشکیل داد. شعله در انتهای لوله باز بالا به سمت پایین منتشر شد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که فاصله خاموشی برای شعله‌های متان بدون ذرات آلومینیوم حدود ۳/۵ میلی‌متر است و با حضور ۲۷۰ گرم بر مترمکعب آلومینیوم به ۹/۵ میلی‌متر افزایش می‌یابد. همچنین نتایج حاکی از آن است که شعله مخلوط آلومینیوم-متان فقط در غلظت‌های حدود ۳۰۰ گرم بر مترمکعب ظاهر می‌شود. در غلظت‌های کمتر از ۴۰۰ گرم بر مترمکعب، شعله آلومینیوم از شعله متان جدا شده و در حالی که شعله متان هنوز در حال انتشار است، خاموش شده است.

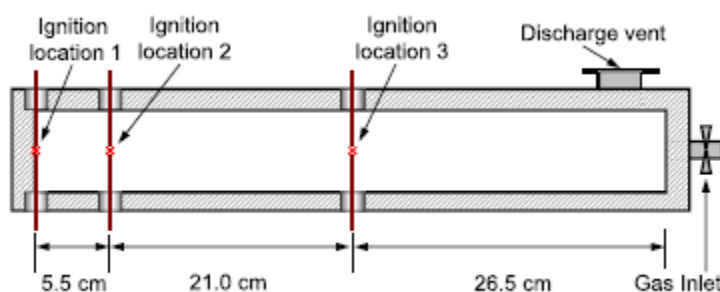
¹- Palecka

۳-۲-۱۱- هاشمی و همکاران ۱۳۹۲ [۶۹]:

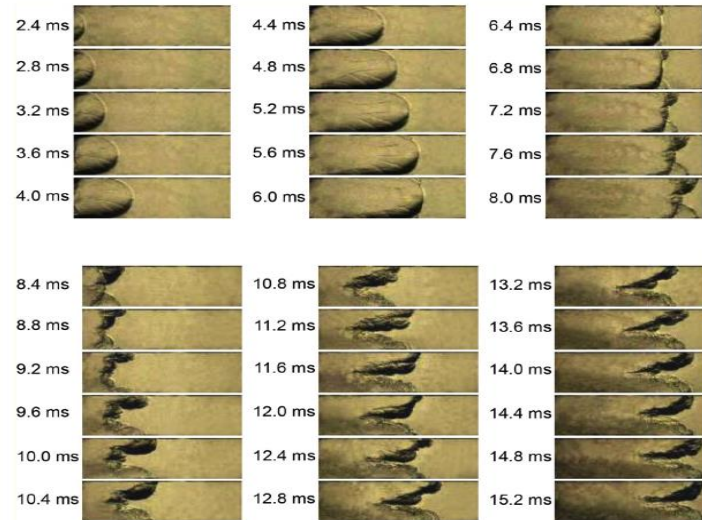
در این مطالعه پایداری شعله در مخلوط رقیق سوخت و هوا در یک مشعل متخلخل فلزی-سرامیکی مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. موقعیت شعله به کمک پروفیل دمای جانبی در دیواره مشعل به دست می‌آید. در نسبت هم ارزی و نرخ شعله‌های مختلف، پروفیل دما به دست می‌آید و موقعیت شعله مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در نسبت هم ارزی حدود یک، پایداری شعله مشاهده شده است. با افزایش نسبت هم ارزی، محل استقرار شعله به درون محیط متخلخل فلزی منتقل می‌شود. در هیچ یک از این نسبت‌های هم ارزی، شعله در یک محیط سرامیکی تشکیل نمی‌شود.

۳-۲-۱۲- کیائو و همکاران ۲۰۱۴ [۷۰]:

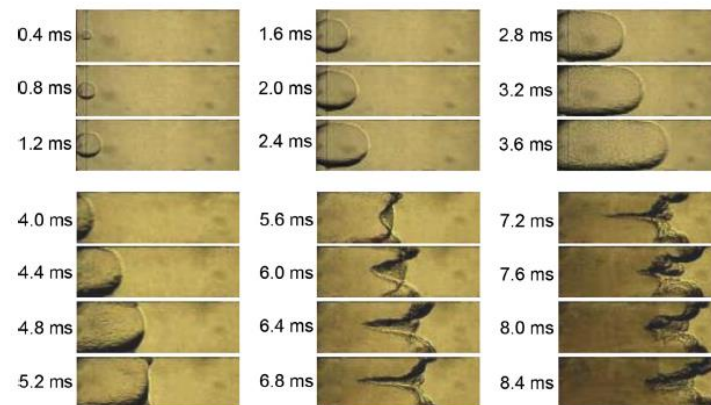
کیائو و همکاران، تأثیر موقعیت جرقه در انتشار شعله در مخلوط هیدروژن-هوا با $\phi = 1.58$ را در یک مخزن بسته افقی با مقطع مستطیلی مورد مطالعه قرار دادند. جرقه در سه موقعیت مختلف که در شکل (۱۱-۳) نشان داده شده در محفظه اعمال شده و تصاویر جبهه شعله در شکل‌های (۱۲-۳ تا ۱۴-۳) آورده شده است.



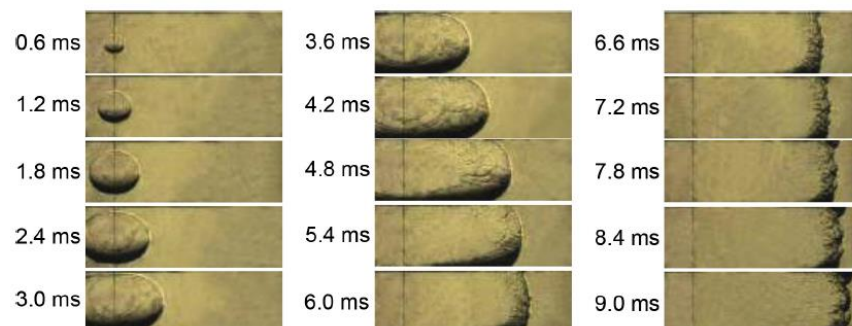
شکل ۱۱-۳: شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی [۷۰]



شکل ۳-۱۲: تصاویر جبهه شعله برای موقعیت ۱ جرقه [۷۰]

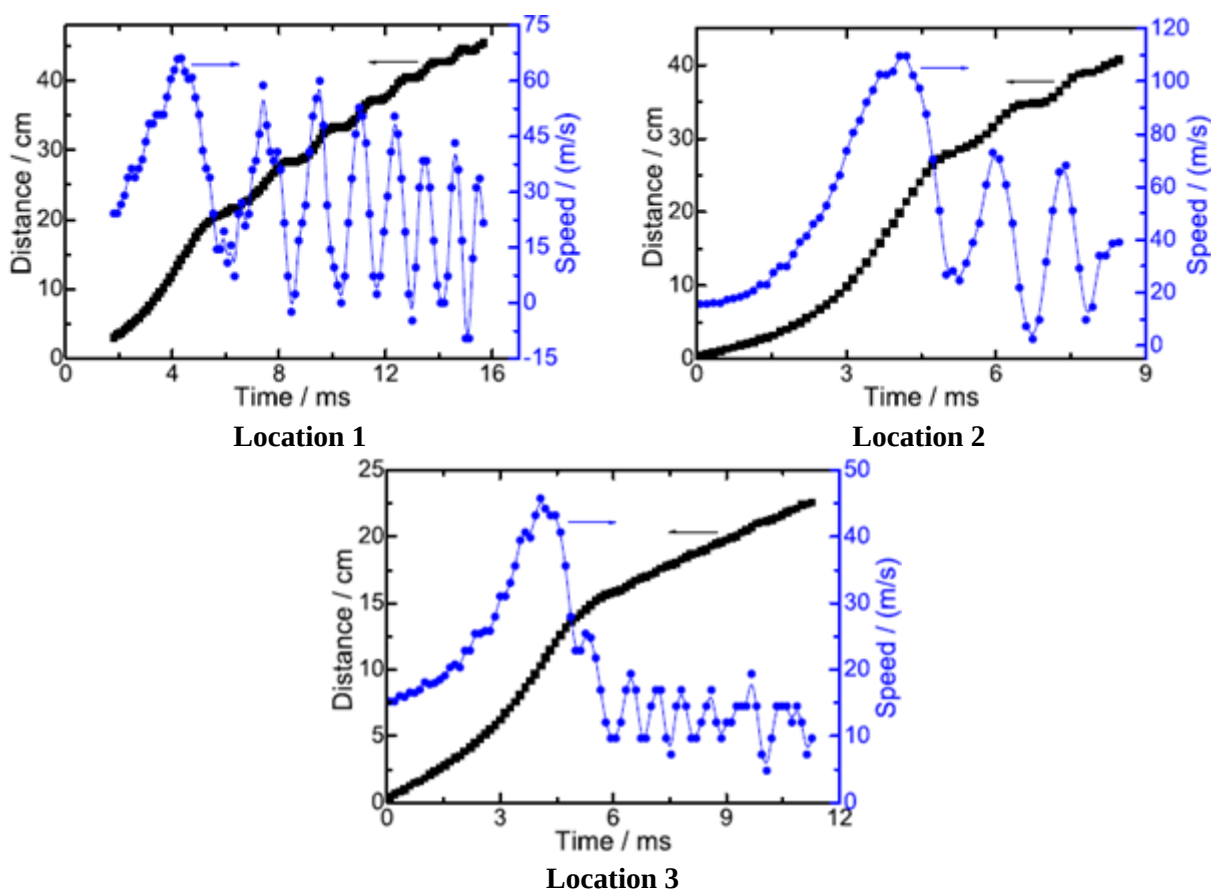


شکل ۳-۱۳: تصاویر جبهه شعله برای موقعیت ۲ جرقه [۷۰]



شکل ۳-۱۴: تصاویر جبهه شعله برای موقعیت ۳ جرقه [۷۰]

کیانو نشان داد که موقعیت سیستم جرعه تأثیر مهمی در رفتار شعله دارد و هنگامی که شعله در نزدیکی انتهای محفظه باشد، تلفات حرارتی از دیواره انتهایی موجب کاهش اثر انبساط حرارتی و در نتیجه تأثیر بر انتشار شعله می‌شود. همچنین او نشان داد که منبع حرارتی با کمی فاصله از دیواره موجب می‌شود نتایج انطباق خوبی با تئوری داشته باشد. در شکل (۳-۱۵) تغییرات موقعیت جبهه گل لاله و تغییرات سرعت شعله را برای سه موقعیت مختلف جرعه نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱۵: نمودار مکان گل لاله و سرعت شعله نسبت به زمان برای موقعیت‌های متفاوت جرعه [۳۰]

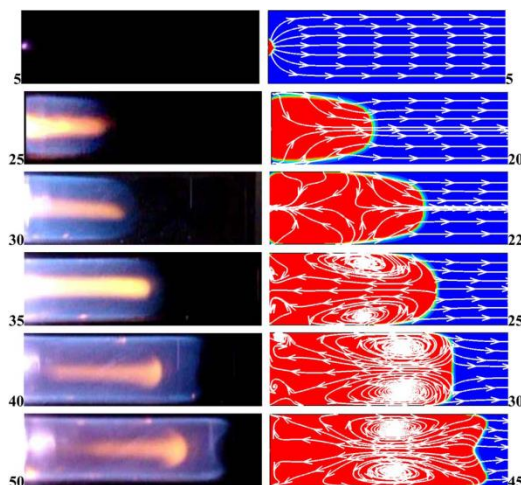
طبق نتایج تحقیقات کیانو:

(۱) موقعیت جرعه تأثیر قابل توجهی بر دینامیک شعله دارد از جمله این تغییرات می‌توان به تغییر شکل شعله، اتلاف حرارتی، تأثیر بر روی محصولات احتراق و شتاب شعله اشاره کرد. همچنین تماس شعله با دیواره‌های داخلی آغاز شعله لاله شکل را به تأخیر می‌اندازد.

- (۲) وقتی که جرقه در موقعیت ۲ می باشد شتاب شعله و ویژگی های آن به خوبی با تئوری همخوانی دارد.
- (۳) با قرار گرفتن جرقه در موقعیت ۳ شعله در مرکز محفظه شکل می گیرد و انتشار شعله به دلیل عدم فضای کافی شتاب شعله کمتر شده و جبهه شعله لاله ای شکل تشکیل نمی شود.
- (۴) برای موقعیت ۲ جرقه، موج فشاری بسیار قوی بوده و موجب نوسانات دوره ای شدید در شعله می شود.

۳-۲-۱۳- چن و همکاران^۱ ۲۰۱۵ [۷۱]

چن و همکاران مطالعه عددی و آزمایشگاهی بر روی مخلوط پیش آمیخته استوکیومتری متان-هوا با مدل آزمایشگاهی مشابه مرجع [۶۹] انجام شده است و ابعاد $80 \times 80 \times 500$ میلی متر که نسبت طول محفظه به عرض مقطع آن $L/D = 6.25$ می باشد. تاثیر نسبت طول به عرض محفظه بر روی مشخصه های جبهه شعله به طور عددی بررسی شده است. شبیه سازی عددی بر اساس جریان آشفته و استفاده از روش گردابه بزرگ انجام شده است. در شکل (۳-۱۶) تصویر رشد جبهه شعله به طور آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی به همراه خطوط جریان نشان داده شده است.

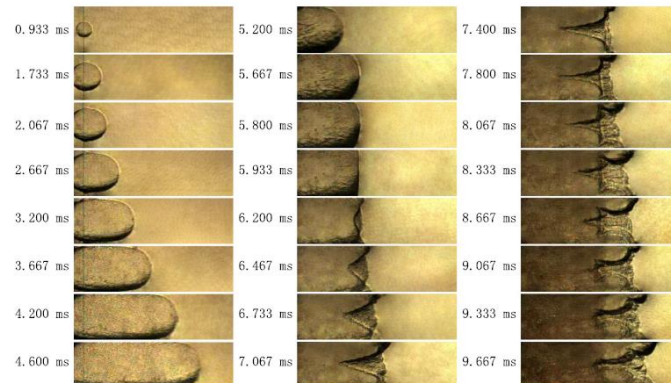


شکل ۳-۱۶: تصویر رشد جبهه شعله به طور آزمایشگاهی و شبیه سازی به همراه خطوط جریان [۷۱]

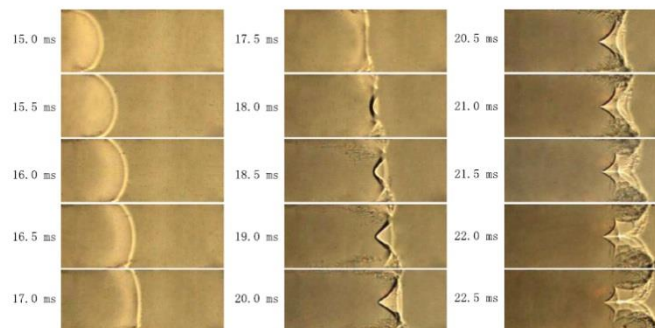
¹ Chen

۳-۲-۱۴- سان و شن^۱ ۲۰۱۵ [۷۲]

در این تحقیق به طور آزمایشگاهی رفتارهای جبهه شعله برای هیدروژن-هوا و پروپان-هوا را در یک محفظه بسته مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از تصویربرداری در شکل‌های (۳-۱۷ و ۳-۱۸) آورده شده است.



شکل ۳-۱۷: تصویر شعله برای مخلوط هیدروژن-هوا [۷۲]



شکل ۳-۱۸: تصویر شعله برای مخلوط پروپان-هوا [۷۲]

طبق نتایج مطالعاتی آن‌ها:

- (۱) انحراف جبهه شعله از حالت لاله‌ای، منحصر به مخلوط هیدروژن- هوا نمی‌باشد هر چند قبل از این مشخص بوده است ولی برای اولین بار برای مخلوط پروپان-هوا این رفتار را مشاهده و بررسی کردند.

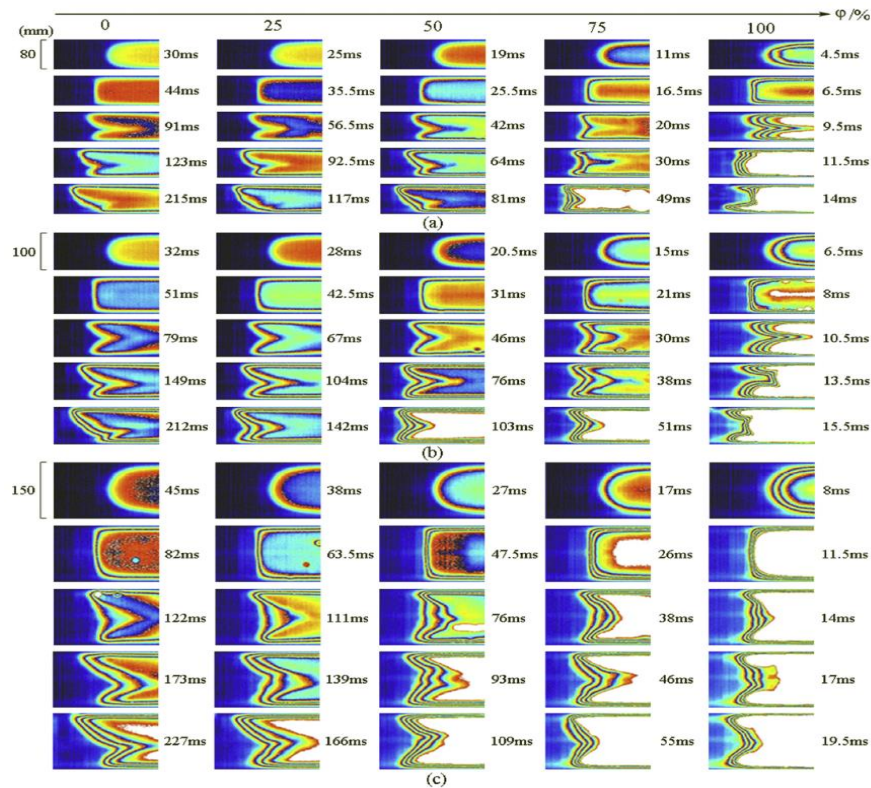
¹ Sun and Shen

۲) بعد از مسطح شدن شعله در مخلوط هیدروژن- هوا، فشار در طول ایجاد اعوجاج و ایجاد شکل لاله‌ای جبهه شعله، به طور پله‌ای و ناگهانی افزایش می‌یابد، در صورتی که در شعله پروپان-هوا تغییرات فشار کاملاً متفاوت بوده و با شیب خطی افزایش می‌یابد و شکل لاله‌ای جبهه شعله تشکیل می‌شود.

۳-۲-۱۵- یو^۱ و همکاران ۲۰۱۶ [۷۳]

در این مقاله رفتارهای جبهه شعله برای مخلوط متان- هیدروژن- هوا با نسبت‌های ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ برای هیدروژن را در شش محفظه بسته با ابعاد مختلف مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که شکل شعله با تغییر نسبت هیدروژن و نسبت ابعاد محفظه تغییر می‌کند. در کوچکترین نسبت ابعاد تنها چهار مرحله تشکیل گل لاله دیده می‌شود و در ابعاد بزرگ‌تر جبهه شعله تکامل پیدا می‌کند. او نشان داد در مواردی که میزان هیدروژن کمتر است شکل شعله نامتقارن شده و قسمت پایینی هلالی شکل شعله با سرعت کمتری نسبت به قسمت بالایی هلال منتشر می‌شود. نتایج حاصل از تصویر برداری در شکل (۱۹-۳) آورده شده است.

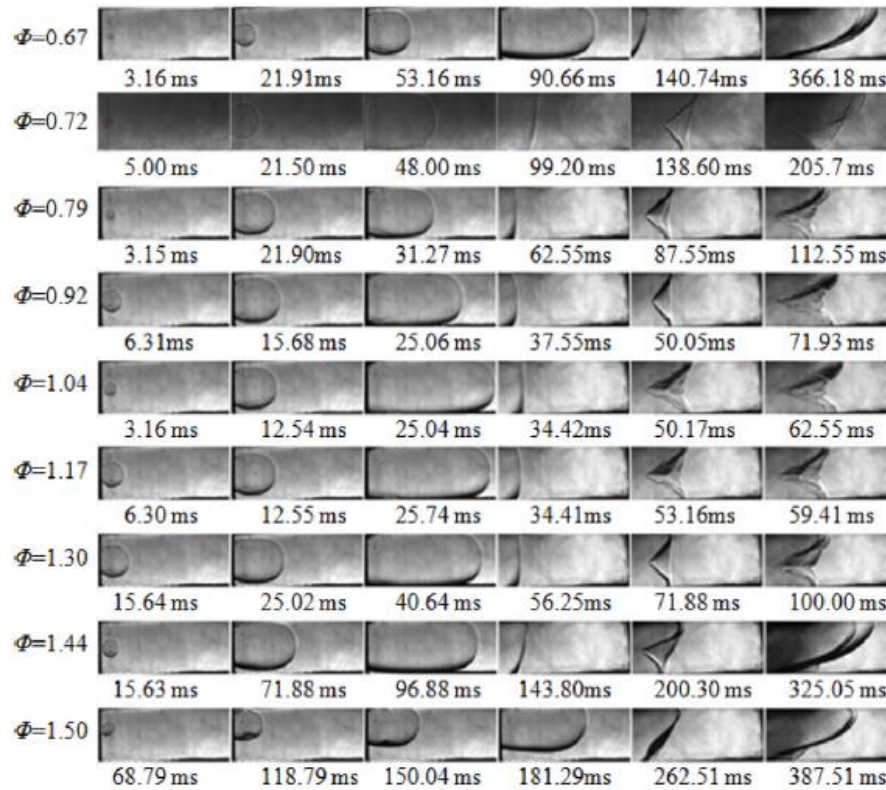
¹- Yu



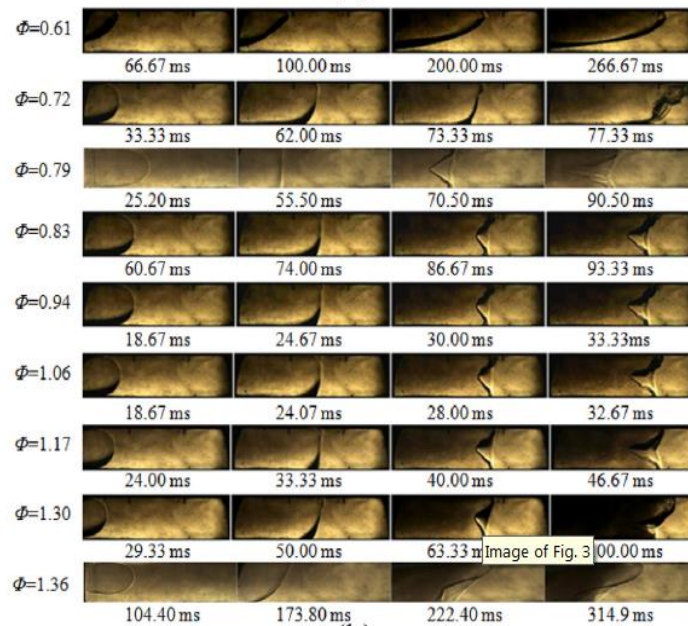
شکل ۳-۱۹: تصاویر شعله برای ابعاد A، B و C با نسبت های مختلف هیدروژن در مخلوط [۷۳]

۳-۲-۱۶- چن و همکاران ۲۰۱۷ [۷۴]

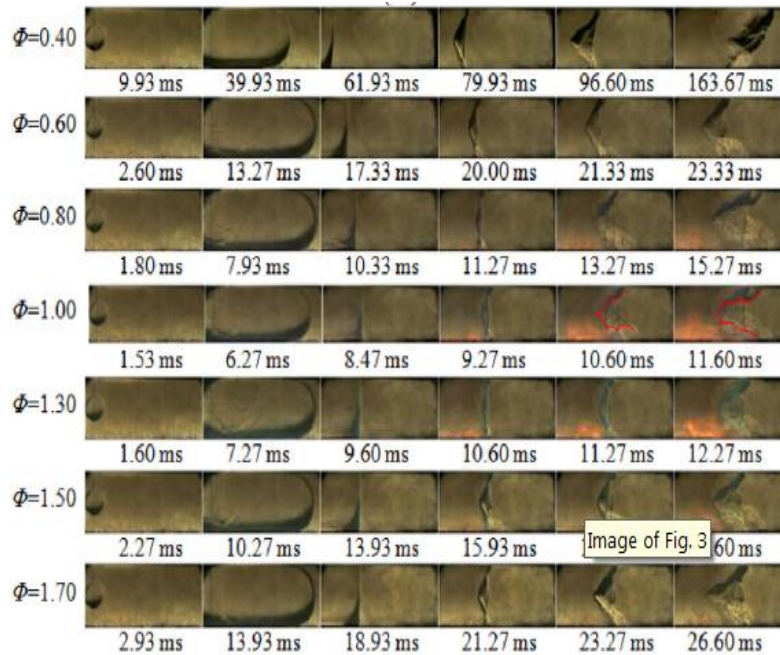
در این مطالعه آزمایشگاهی رفتارهای جبهه شعله برای متان، استیلن و گاز طبیعی را در نسبت های سوخت به هوای مختلف در یک محفظه بسته بررسی شد. مجموعه آزمایشگاهی در این مقاله همان مجموعه مرجع [۶۹] می باشد. نتایج حاصل از تصویر برداری برای سه نوع گاز مختلف با نسبت های مختلف هم ارزی در شکل های (۳-۲۰) تا (۳-۲۲) آورده شده است.



شکل ۳-۲۰: تغییرات شکل شعله برای مخلوط گاز طبیعی-هوا برای نسبت های هم ارزی مختلف [۷۴]



شکل ۳-۲۱: تغییرات شکل شعله برای مخلوط متان-هوا برای نسبت های هم ارزی مختلف [۳۴]



شکل ۳-۲۲: تغییرات شکل شعله برای مخلوط استیلن-هوا برای نسبت های هم ارزی مختلف [۷۴]

طبق نتایج این مطالعه:

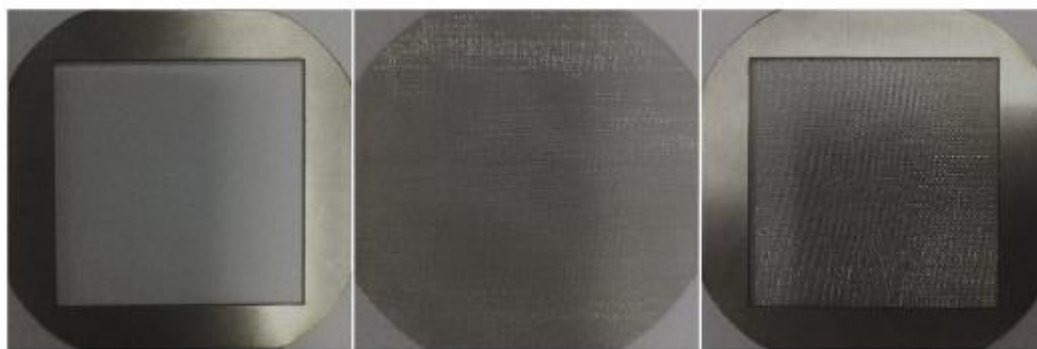
(۱) جبهه شعله گل لاله گون کلاسیک برای گاز طبیعی در $0.72 \leq \phi \leq 1.44$ ، برای متان در $0.79 \leq \phi \leq 1.3$ و برای استیلن $0.40 \leq \phi \leq 1.70$ تشکیل می شود.

(۲) ماهیت سوخت گازی تأثیر قابل توجهی بر سرعت انتشار شعله و شکل آن دارد. مقدار کم اتان و پروپان موجود در گاز طبیعی باعث افزایش شتاب انتشار شعله و افزایش فشار و اختلاف در شکل و ساختار شعله در مقایسه با متان خالص می شود و در عین حال استیلن دارای سریع ترین سرعت پخش شعله و فشار حداکثر به علت بالاتر بودن سرعت واکنش شیمیایی می باشد.

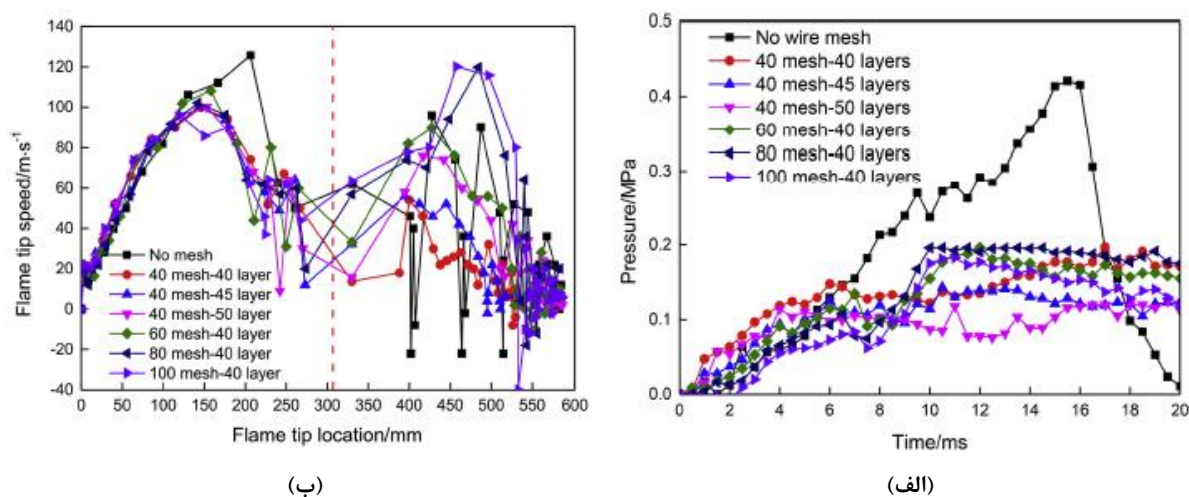
۳-۲-۱۷- جین و همکاران ۲۰۱۷ [۷۵]

در این تحقیق به منظور بهبود ایمنی کاربرد انرژی هیدروژن، یک مطالعه تجربی بر روی تأثیر شبکه سیمی چند لایه بر دینامیک انتشار شعله پیش مخلوط هیدروژن-هوا در یک محفظه بسته انجام شده است. در این آزمایش چهار نوع مختلف توری سیمی با اندازه حفرات ۴۰، ۴۵ و ۵۰ مش در آزمایش ها انتخاب شده اند

(شکل ۳-۲۳). برای ثبت تغییرات شکل شعله و تعیین سرعت نوک شعله از روش عکسبرداری شیلین با سرعت بالا و برای اندازه گیری فشار گذرا از مبدل فشار استفاده شده است. طبق نتایج این مطالعه هنگام افزودن توری سیمی ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ مش با توری سیمی ۴۵ و ۵۰ مش، شعله خاموش می‌شود، در حالی که برای توری سیمی ۴۰ مش، افزودن توری سیمی ۵۰ مشی نیز نمی‌تواند شعله را خاموش کند. علاوه بر این، شبکه سیمی چند لایه می‌تواند به طور موثری سرعت نوک شعله، حداکثر فشار و امواج صوتی را در طول انتشار شعله مخلوط هیدروژن-هوا را کاهش دهد. حداکثر فشار کاهش یافته در صورت اضافه کردن توری سیمی ۱۰۰ مش ۵۰ لایه به حدود ۷۸/۶ درصد می‌رسد (شکل ۳-۲۴).



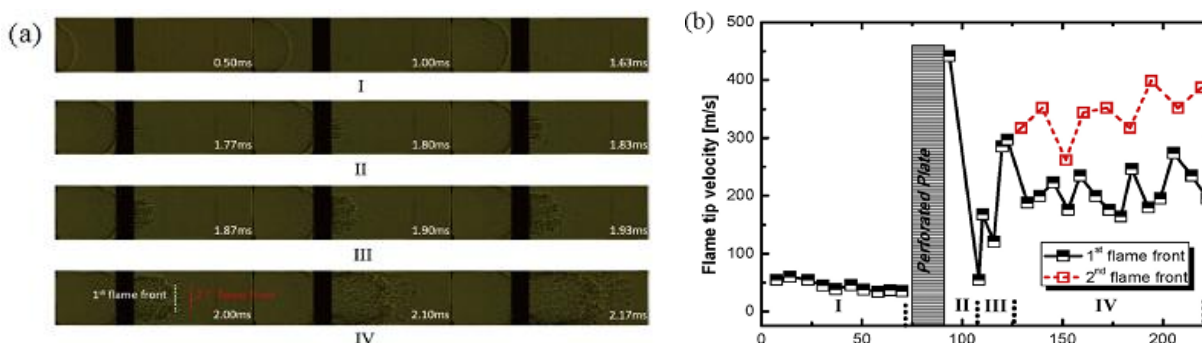
شکل ۳-۲۳: توری های سیمی مورد استفاده در تحقیق



شکل ۳-۲۴: (الف) فشار به عنوان تابعی از زمان در محفظه بسته هنگام انتشار شعله از طریق توری سیمی، (ب) مقایسه سرعت نوک شعله بدون توری سیمی و با حضور تور سیمی با مش‌های مختلف [۷۵]

۳-۲-۱۸- لی^۱ و همکاران ۲۰۱۸ [۷۶]

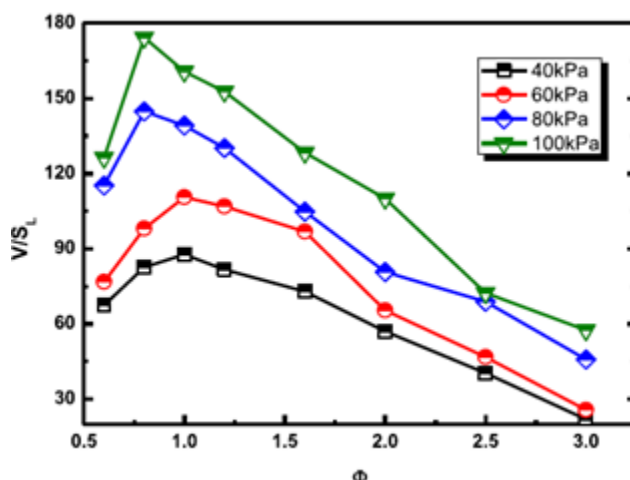
انتشار شعله از یک صفحه سوراخدار به صورت آزمایشی در یک محفظه با مقطع مربع توسط لی و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. این آزمایش در مخلوط هیدروژن و هوا با نسبت‌های هم‌ارزی مختلف و فشارهای اولیه متفاوت انجام شده است. همچنین عکس‌برداری از جبهه شعله با ۳۰۰۰ فریم در ثانیه انجام شد. بطور کلی چهار مرحله برای جلو رفتن شعاع شعله از صفحه سوراخدار به دست آمده است که عبارتند از شعله آرام، شعله جت یا پرفشار، شعله آشفته و شعله ثانویه. پس از احتراق، یک شعله آرام به دست می‌آید که تقریباً تحت تأثیر مانع قرار نمی‌گیرد. این شعله آرام برای عبور از صفحه سوراخدار، فشرده شده و شعله جت و پرفشار را با تغییر میزان سرعت، تولید می‌کند. شعله آشفته با ادغام شعله پرفشار تولید می‌شود که باعث تسریع در برابر شعله آتش می‌شود. شعله ثانویه ناشی از بی‌ثباتی در فرآیند جبهه شعله آشفته در حال حرکت به جلو می‌باشد. در شکل (۳-۲۵) تصویر (a) انتشار شعله و شکل‌گیری انواع شعله به ترتیب شعله آرام، شعله جت یا پرفشار، شعله آشفته و شعله ثانویه نشان داده شده است و در تصویر (b) تغییرات سرعت شعله در موقعیت‌های مختلف در نسبت هم‌ارزی ۰/۶ و فشار ۸۰ کیلوپاسکال ترسیم شده است.



شکل ۳-۲۵: (a) تصویر انتشار شعله و تصویر b تغییرات سرعت شعله در موقعیت‌های مختلف [۷۶]

در شکل (۳-۲۶) نمودار تغییرات متوسط سرعت شعله در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف در فشارهای اولیه مختلف ترسیم شده است.

¹ Li



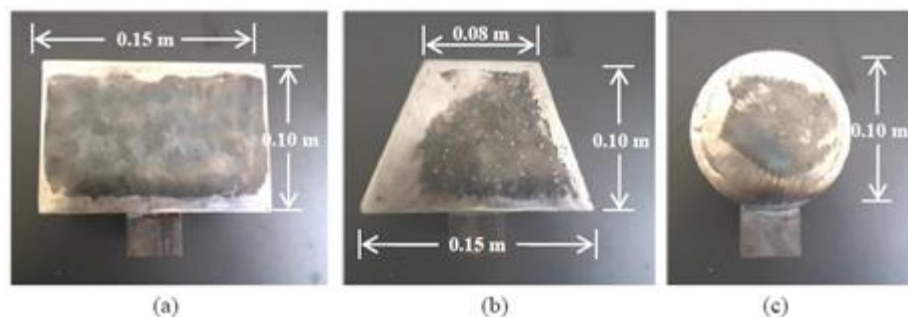
شکل ۳-۲۶: نمودار تغییرات متوسط سرعت شعله در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف [۷۶]

نتایج نشان می‌دهد که شعله دوم ثانویه در مخلوط استوکیومتری با افزایش فشار اولیه آشکارتر است و با افزایش سرعت انتشار و بالارفتن فشار نسبت مستقیم و افزایشی دارد. این بررسی باعث درک بهتر شتاب شعله با استفاده از صفحه سوراخ‌دار شد. همچنین مشخص شد در مخلوط استوکیومتری با افزایش فشار اولیه، سرعت انتشار بالاتر می‌رود.

۳-۲-۱۹- لیو^۱ و همکاران ۲۰۱۸ [۷۷]

در این تحقیق ویژگی‌های متنوع شعله و شکل افقی جبهه شعله مخلوط متان با هوا با حجم غلظت ۹/۵ درصد در یک محفظه فولادی آب بندی شده به طول ۶/۵ متر و مربعی به ضلع ۲۰۰ میلی‌متر مورد مطالعه قرار گرفت. تصاویر با استفاده از دوربین دیجیتال با سرعت ۱۰۰۰ فریم بر ثانیه گرفته شد. در این آزمایش از موانع مستطیلی، دوزنقه‌ای و کروی در وسط محفظه ۴ متر بعد از جرقه و ۲ متر مانده به دیوار انتهایی استفاده شده است. طول شعله و حداکثر سرعت عبور از موانع مستطیلی، دوزنقه‌ای، دایره‌ای، تغییرات شکل پیشانی شعله، فشار لحظه تولید شده در جلو و پشت موانع و تغییر سرعت پخش شعله نیز مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۳-۲۷) شکل موانع مورد استفاده در آزمایش نشان داده شده است.

¹ Lei Wang



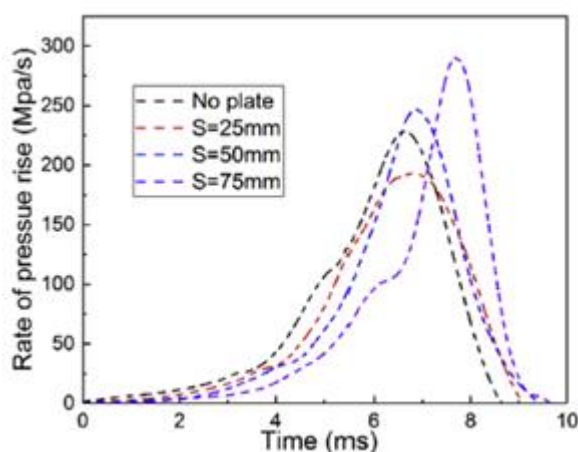
شکل ۳-۲۷: شماتیک موانع مورد استفاده در آزمایشات
(a) مانع مستطیلی (b) مانع ذوزنقه (c) مانع کروی [۷۷]

طبق نتایج این مطالعه، فضاهای محدودی بین بالا، پایین و دو طرف موانع و محفظه وجود دارد. فشارهای مختلف در این فضاهای محدود از اندازه‌های مختلف موجب تغییرات در حالت‌های جریان و سرعت انتشار شعله پیش‌بینی شده می‌شود که از طریق این مناطق عبور می‌کند. مطابق آزمایش‌ها حداکثر انحراف جانبی در ارتفاع $1/5$ برابر ضخامت مانع موارد مستطیلی و کروی که از جلوی شعله می‌گذرد اتفاق می‌افتد.

همچنین مانع کروی جریان ورودی شعله انفجاری را در دو جهت هدایت می‌کند. در نتیجه، مانع کروی توانایی ضعیف‌تری برای هدایت جریان ورودی دارد. در آزمایش‌ها مانع مستطیلی به شدت مزاحم عبور جریان و ایجاد بالاترین فشار را دارد و پس از آن مانع کروی و سپس ذوزنقه است. بطور کل میدان‌های جریان در مقابل و در پشت موانع مستطیلی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. مانع ذوزنقه‌ای، نیروی ناشی از انفجار شعله در حال رشد را به کمترین حد افزایش می‌دهد. همچنین اثر شتاب لحظه‌ای و شعاع افقی شعله که از طریق مانع کروی عبور می‌کرد، بیشتر از سایر اشکال بود. بنابراین در مانع کروی تأثیر نیروی انفجار شعله در طول منطقه‌ای که توسط مانع اشغال شده است، در مقایسه با موانع دیگر به شدت افزایش نشان می‌دهد.

۳-۲-۲۰- لو^۱ و همکاران ۲۰۱۹ [۷۸]

لو و همکارانش اثر یک صفحه دیافراگم بر رفتار انفجار مخلوط هوا/هیدروژن در نسبت‌های هم ارزی ۱/۶، ۱/۴ و ۱/۲ در یک سیلندر به قطر ۲۱۰ میلی‌متر و در دمای اتاق ۲۹۸ کلوین و فشار محیط ۱ اتمسفر گزارش کردند. آن‌ها تأثیر صفحه دیافراگم در مقایسه با وضعیت بدون صفحه بر میزان حداکثر افزایش فشار و سرعت انتشار شعله را بررسی نمودند. صفحه مورد استفاده به ضخامت ۵ میلی‌متر دارای سوراخ‌هایی به قطر ۲۵ میلی‌متر و نسبت انسداد آن (BR) ۵۰ و ۷۵ است. در این آزمایش حداکثر فشار انفجار (P_{max})، مدت زمان احتراق و حداکثر نرخ افزایش فشار به دست آمد. نتایج نشان داد تأثیر صفحه دیافراگم بر میزان حداکثر افزایش فشار در مقایسه با وضعیت بدون صفحه سوراخ‌دار قابل توجه است. همچنین انتقال و تلفات گرما به صفحه دیافراگم باعث کاهش سرعت انتشار شعله می‌شود شکل (۲۸-۳).

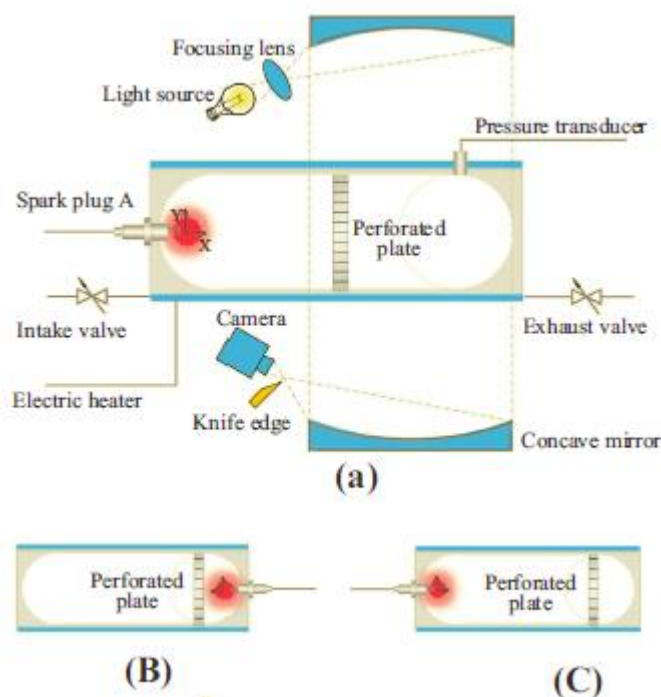


شکل ۳-۲۸: نمودار فشار احتراق هیدروژن هوا بدون صفحه و $BR = 0.94$ صفحه سوراخدار [۷۸]

¹ Lu Wang

۳-۲-۲۱- لیو^۱ و همکاران ۲۰۱۹ [۷۹]

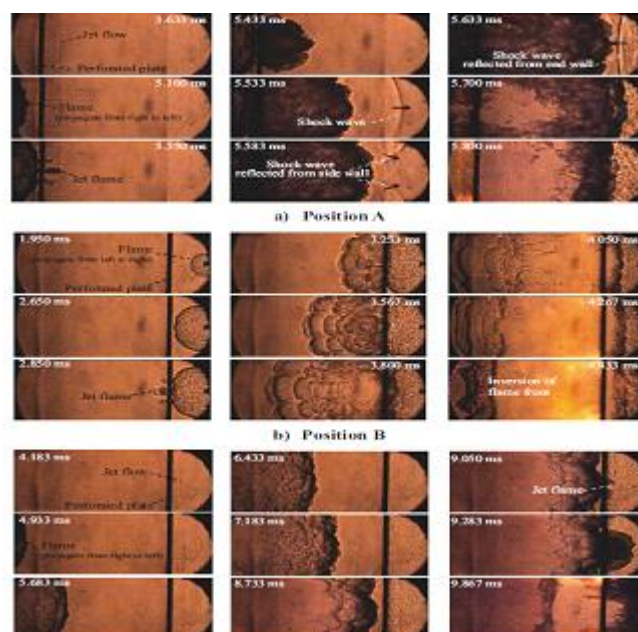
در این مقاله انتشار شعله و پدیده احتراق در یک سیلندر با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و طول ۲۳۰ میلی‌متر، دارای مانع از نوع صفحه سوراخ‌دار ۵ میلی‌متری در موقعیت‌های مختلف بررسی گردید و پدیده‌های مختلف احتراق از قبیل انتشار شعله آشفته، امواج شوک در طول برخورد با مانع مشاهده شد. این آزمایش با استفاده از یک دستگاه آزمایشگاهی پیشرفته با پنجره‌های بزرگ و همراه با دوربین سرعت بالا و روش عکس‌برداری سایه‌نگاری انجام شد. تصاویر احتراق با استفاده از یک سیستم تصویربرداری سرعت بالا (۷۰۰۰۰ فریم در ثانیه) ثبت شده است. در این مقاله، همانطور که در شکل (۳-۲۹) نشان داده شده است، آزمایش‌ها در سه موقعیت مختلف A تا C نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۹: شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی [۷۹]

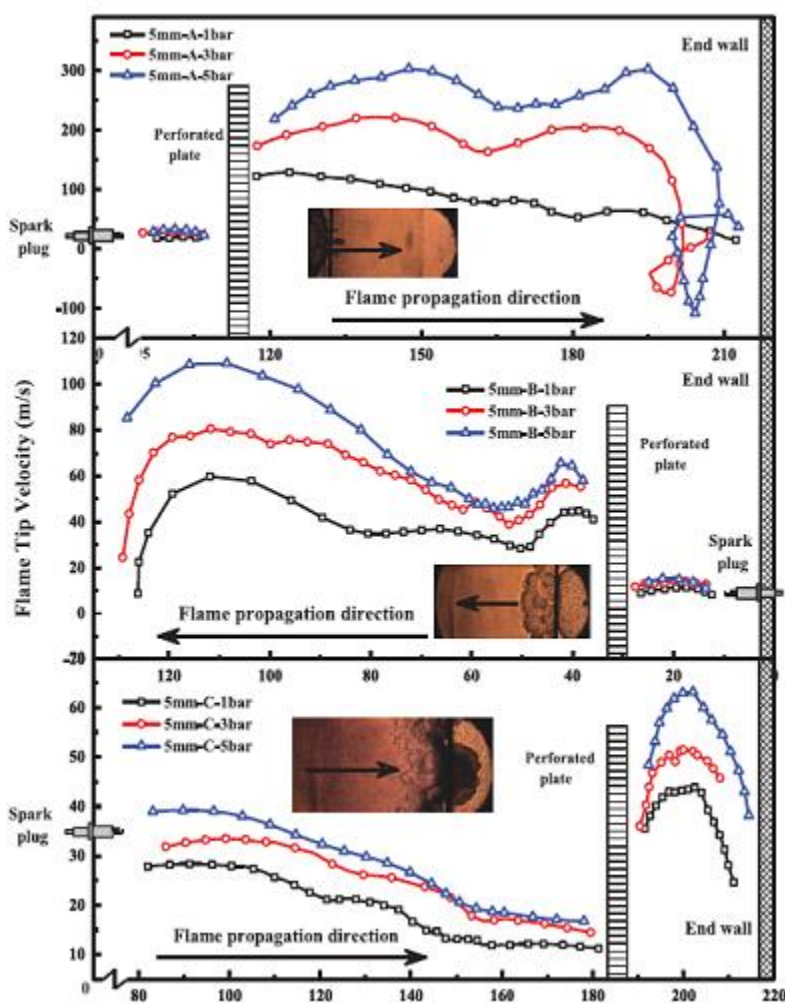
¹ Lei

- در موقعیت A سوپاپ جرقه بر روی دیواره چپ نصب شده و صفحه سوراخ‌دار در وسط اتاق احتراق، ۱۱۵ میلی‌متر از دیواره سمت راست و ۱۰۶ میلی‌متر از موقعیت جرقه می‌باشد. فرایند کامل شامل شعله‌ای است که از صفحه سوراخ‌دار عبور می‌کند و به سمت دیواره انتهایی حرکت می‌کند و قابلیت مشاهده دارد.
- در موقعیت B سوپاپ در دیواره سمت راست محفظه نصب شده است و صفحه سوراخ‌دار در قسمت راست اتاق احتراق، ۳۵ میلی‌متر از دیواره سمت راست و ۲۶ میلی‌متر از موقعیت جرقه می‌باشد. فرایند کامل شامل فرایند احتراق و انتشار جزئی در بالای صفحه سوراخ‌دار است که می‌تواند مشاهده شود.
- در موقعیت C سوپاپ جرقه در دیواره چپ محفظه نصب شده بود و صفحه سوراخ‌دار در وسط محفظه احتراق، ۲۲ میلی‌متر از دیواره سمت راست و ۱۸۰ میلی‌متر از موقعیت جرقه می‌باشد. فرایند کامل شامل شعله‌ای که از طریق صفحه سوراخ‌دار عبور می‌کند و به دیواره انتهایی می‌رسد و قابل مشاهده است. در شکل (۳-۳۰) انتشار شعله براساس فاصله‌های مختلف بین موقعیت جرقه و صفحه سوراخ‌دار در فشار اولیه ۵ بار و اندازه سوراخ ۵ میلی‌متر نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۰: انتشار شعله براساس فاصله‌های مختلف بین جرقه و صفحه سوراخ‌دار. [۷۹]

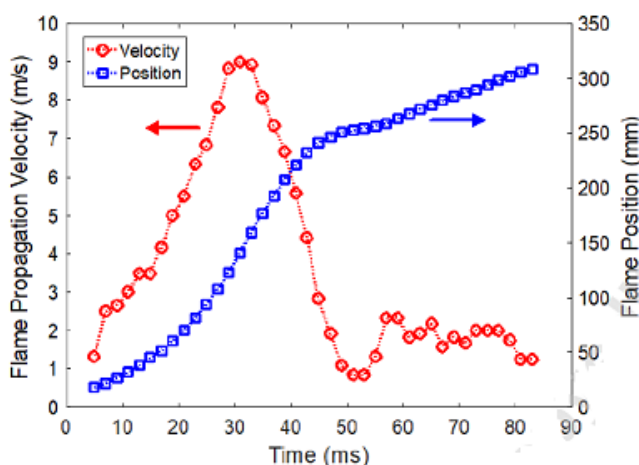
در شکل (۳-۳۱) زیر پروفیل نوک شعله و سرعت موج شوک در شرایط مختلف و موقعیت های مختلف صفحات سوراخ دار نشان داده شده است. با توجه به موقعیت صفحه سوراخ دار (موقعیت A) سرعت نوک شعله پس از عبور از صفحه سوراخ دار با افزایش قطر سوراخ، افزایش می یابد. همچنین تأثیر فواصل کمتر از صفحه سوراخ دار (موقعیت B) رفتارهای پخش شعله قابل توجهی نشان داد. سرعت نوک شعله با افزایش اندازه سوراخ در ابتدا پس از اینکه شعله از طریق صفحه سوراخ دار عبور می کند، کاهش می یابد. به طور کلی، می توان دریافت که شروع مناسب شکل گیری آشفته با موقعیت مطلوب صفحه سوراخ دار در محفظه احتراق می تواند قوی ترین انتشار شعله و شوک شعله را ایجاد کند.



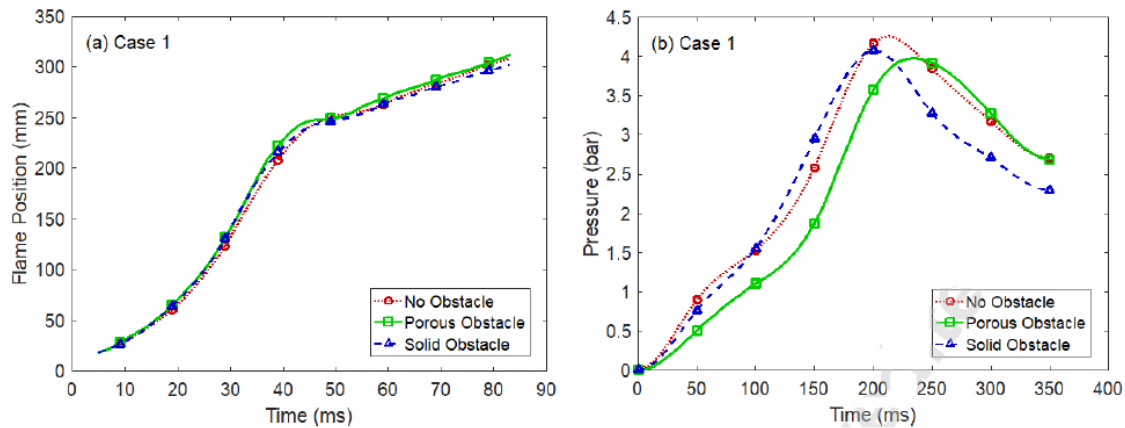
شکل ۳-۳۱: پروفیل نوک شعله و سرعت موج شوک در شرایط مختلف [۷۹]

۳-۲-۲۲- کلاه‌دوز و همکاران ۲۰۱۹ [۸۰]

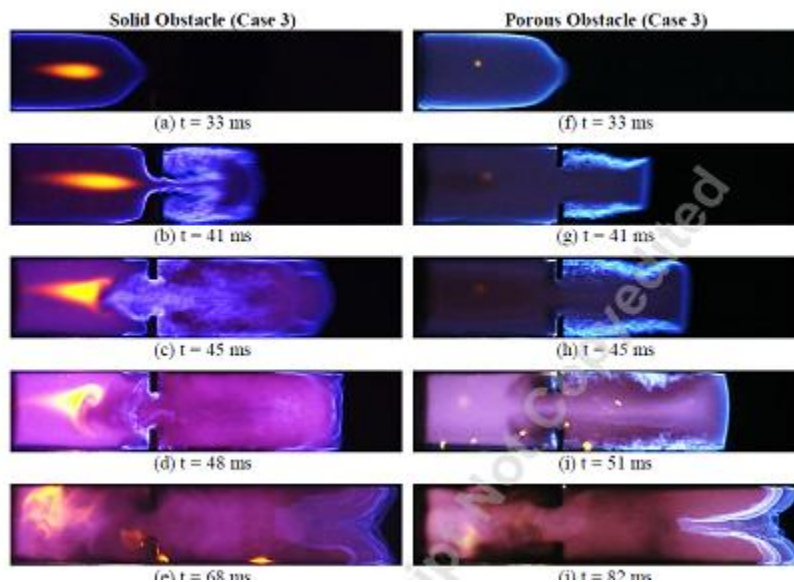
در این پژوهش رفتار شعله مخلوط متان و هوا در یک محفظه بسته به ابعاد $۸ \times ۱۱ \times ۵۰$ سانتی‌متر در سه حالت بدون حضور موانع، حضور موانع متخلخل و حضور موانع جامد مورد بررسی قرار گرفته است. موانع در چهار فاصله مختلف (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر) از موقعیت جرقه نصب شدند و در هر موقعیت مکان شعله، سرعت شعله و فشار ثبت گردید. موقعیت شعله و سرعت انتشار شعله در زمان‌های مختلف در شکل (۳-۳۲) و در شکل (۳-۳۳) (الف) موقعیت جبهه شعله و (ب) تغییرات فشار در زمان‌های مختلف نشان داده شده‌اند. نتایج عکس‌برداری توسط دوربین سرعت بالا Dimax-S با قابلیت ضبط تصاویر ۴۵۰۰ فریم در ثانیه برای سطوح متخلخل و جامد در جلوی شعله در فاصله ۱۵ سانتی‌متر از محل جرقه در شکل (۳-۳۴) آورده شده است. طبق نتایج، مانع نقش اساسی در الگوی رشد شعله و سرعت شعله دارد. در حقیقت، اختلال در جریان گاز، سرعت سوختن را افزایش می‌دهد و پروسه پخش شعله در محفظه بسته را تسریع می‌کند. همچنین مانع متخلخل در تمام شرایط آزمایش شده دارای تأثیر قوی‌تری در کاهش حداکثر فشار داخل محفظه احتراق است.



شکل ۳-۳۲: موقعیت جلو شعله و میزان سرعت انتشار شعله در زمان‌های مختلف [۷۰]



شکل ۳-۳۳: (a) موقعیت جلو شعله (ب) تغییرات فشار در برابر زمان [۸۰]



شکل ۳-۳۴: تصاویر انتشار جبهه شعله با موانع در فاصله ۱۵ سانتی متر از سوپاپ [۸۰]

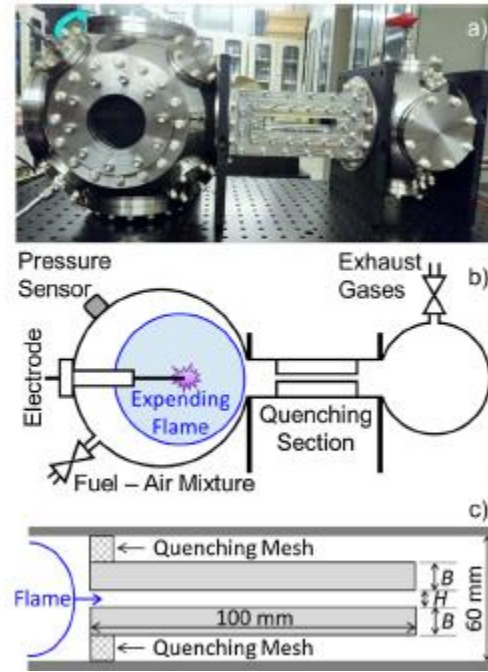
۳-۲-۲۳- آریف^۱ و همکاران ۲۰۱۹ [۸۱]

در این مطالعه، اثر سرعت شعله بر فاصله خاموشی شعله متان-هوا، پروپان-هوا و اتیلن-هوا در یک محفظه احتراق مستطیلی با حجم ثابت مطابق شکل (۳-۳۵) بررسی شده است. آزمایش‌ها در فشار نزدیک به اتمسفر، با دمای اولیه ۲۹۳ درجه کلوین انجام شده است.

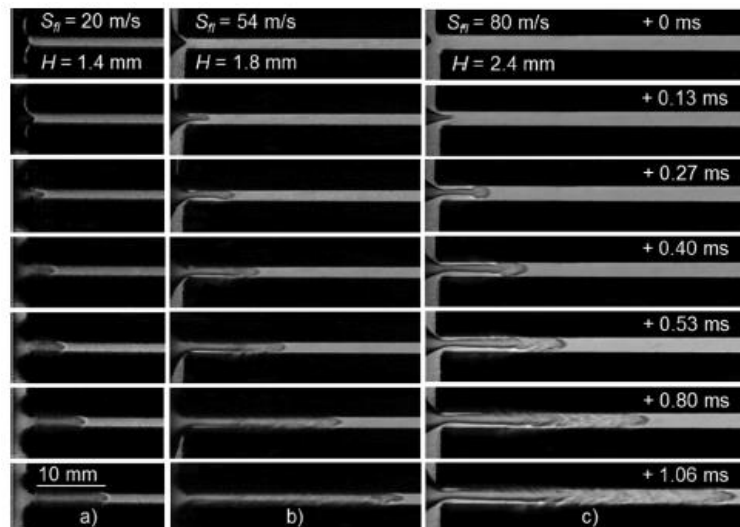
¹ - Ariff

خاموشی شعله با توجه به فشار اندازه‌گیری شده ارزیابی می‌شود و سرعت ظاهری شعله از تصویربرداری سریع

شیلین با نرخ عکسبرداری ۱۵۰۰۰ فریم بر ثانیه تعیین می‌شود (شکل ۳-۳۶).



شکل ۳-۳۵: (الف) تصویر محفظه احتراق حجم ثابت، (ب) شماتیک محفظه احتراق، (ج) عبور شعله از بین دو مانع در محفظه [۸۱]

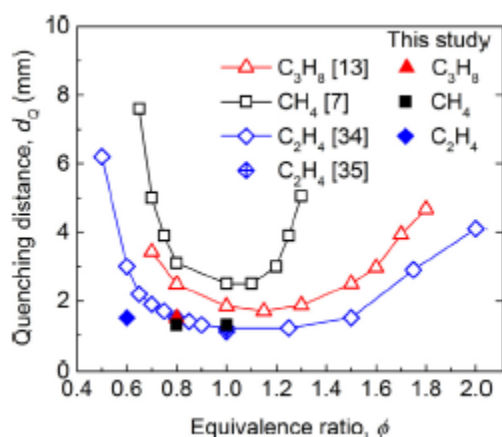


شکل ۳-۳۶: تصاویر شیلین از شعله های متان-هوا استوکیومتری: (الف) سرعت شعله ظاهری ۲۰ متر بر ثانیه و ارتفاع کانال ۱/۴

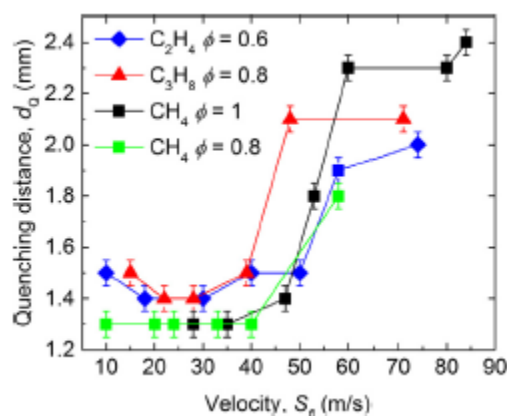
میلیمتر، (ب) سرعت شعله ظاهری ۵۴ متر بر ثانیه و ارتفاع کانال ۱/۸ میلیمتر و (ج) سرعت شعله ظاهری ۸۰ متر بر ثانیه و ارتفاع

کانال ۲/۴ میلیمتر. [۸۱]

نتایج شکل (۳-۳۷) روند مشابهی را برای سه سوخت در نظر گرفته شده نشان می دهد. فاصله خاموشی شعله‌های آرام حدود دو برابر کمتر از زمانی است که جریان در نزدیکی ورودی کانال متلاطم می‌شود. در مورد شعله‌های آرام، فاصله خاموش شدن تقریباً در $1/3 - 1/5$ میلی‌متر برای شرایط در نظر گرفته شده ثابت است، در حالی که برای شعله‌های متلاطم، بسته به سوخت و نسبت هم ارزی، فاصله خاموش شدن در محدوده $2 - 2/5$ میلی‌متر است.



(ب)



(الف)

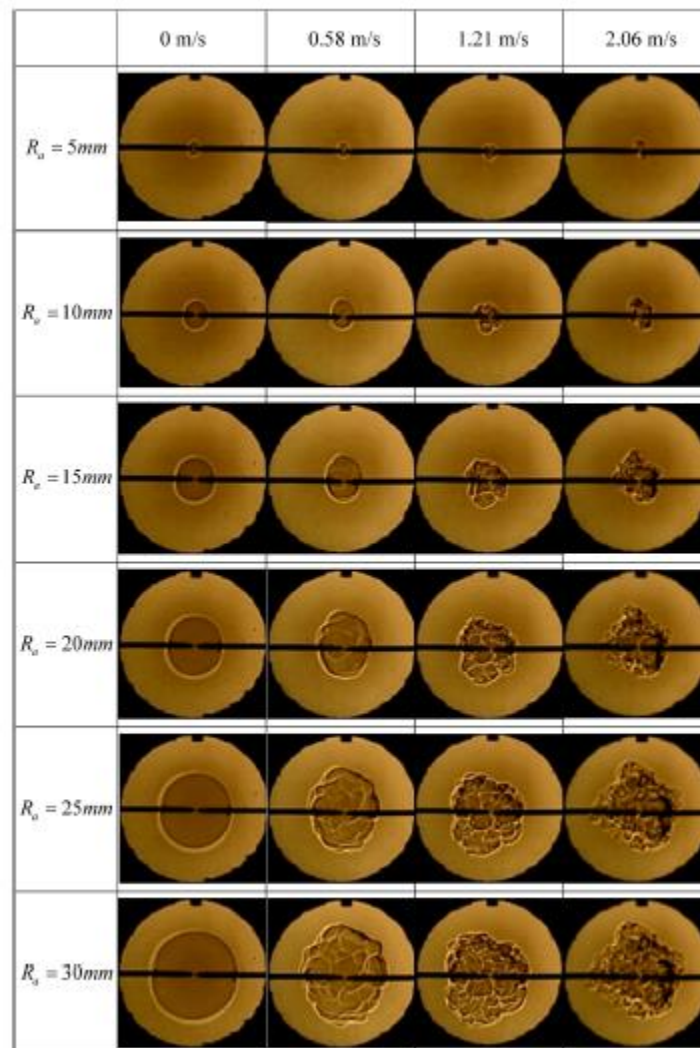
شکل ۳-۳۷: رابطه فاصله خاموشی با (الف) سرعت شعله برای سوخت‌های مورد استفاده (ب) نسبت هم ارزی برای سوخت‌های مورد استفاده [۸۱]

۳-۲۴-۲-۳- ونگ^۱ و همکاران ۲۰۲۰ [۸۲]

در این مطالعه، ویژگی‌های احتراق آشفته متان / هوا از قبیل تصویر شعله و فشار احتراق در یک محفظه احتراق کروی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که وقتی دمای اولیه ۳۰۰ کلوین، فشار اولیه ۱ بار و نسبت هم ارزی ۱ است، شعله در فرآیند انتشار تحت شدت‌های تلاطم مختلف، شکل خود را حفظ می‌کند. با افزایش شدت آشفتگی، ترک‌های بیشتری در سطح شعله و چین و چروک‌های بیشتری در جبهه شعله ایجاد می‌شود (شکل ۳-۳۸). با افزایش شدت آشفتگی، سرعت انتشار شعله و حداکثر فشار احتراق افزایش می‌یابد. در

¹ - Wang

این تحقیق در شدت آشفته‌گی ثابت، آزمون احتراق در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۸، ۱ و ۱/۲ انجام شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفتند. در نسبت هم‌ارزی ۱، سرعت انتشار شعله و سرعت کشش شعله به حداکثر می‌رسد و حداکثر فشار احتراق و نرخ افزایش فشار به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

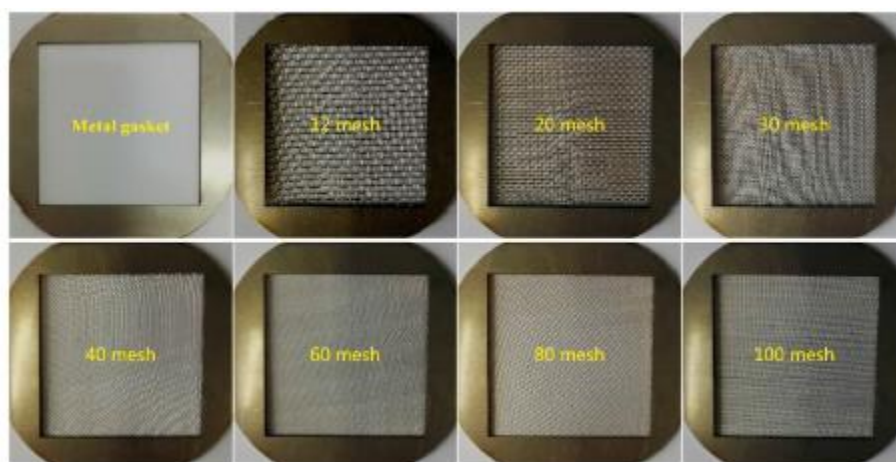


شکل ۳-۳۸: تصویر شعله در شعاع‌های مختلف شعله تحت شدت‌های مختلف آشفته‌گی [۸۲]

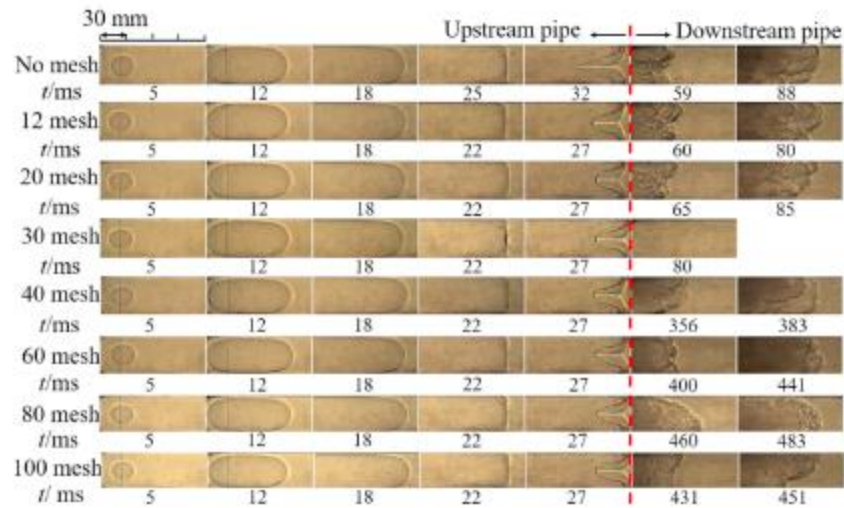
۳-۲-۲۵- جین و همکاران ۲۰۲۰ [۸۳]

در این مطالعه اثر یک توری سیمی تک لایه بر رفتار شعله مخلوط متان و هوا با نسبت استوکیومتری و فشار دینامیکی در یک محفظه بسته به طور تجربی بررسی شده است. در این تحقیق توری سیمی از هفت نوع مختلف

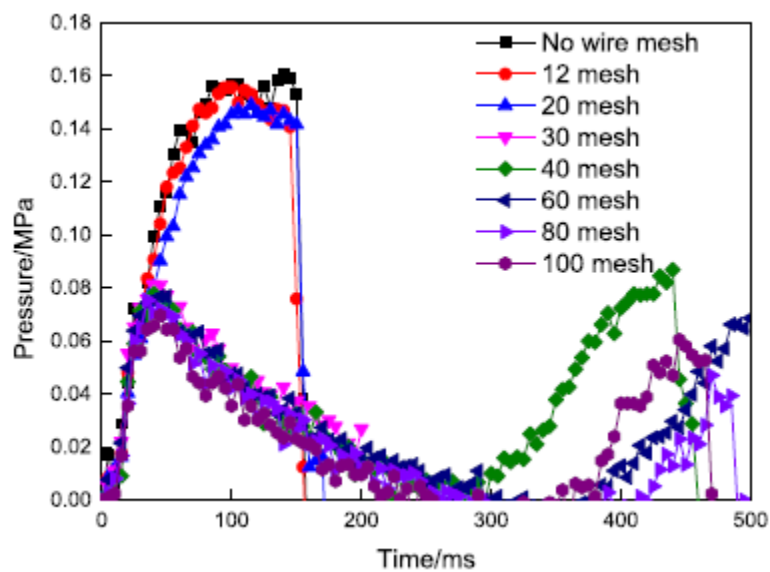
انتخاب شده است (شکل ۳-۳۹) و از سیستم عکاسی شیلیرین با سرعت بالا و مبدل‌های فشار به ترتیب برای ثبت رفتارهای شعله و روند تغییر فشار نسبت به زمان استفاده شده است. طبق نتایج به دست آمده، شعله می‌تواند به راحتی از توری سیمی ۱۲ و ۲۰ مش عبور کند، اما تحت اثر توری سیمی ۳۰ مش خاموش می‌شود. برای مش‌های ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰، شعله از توری سیمی عبور می‌کند. همچنین مطابق شکل (۳-۴۰) نتایج نشان می‌دهد که شبکه سیمی به طور قابل توجهی زمان تشکیل شعله لاله را افزایش می‌دهد و به دلیل تأثیر آن در پیشبرد و تضعیف برهمکنش بین جبهه شعله و امواج فشار، وارونگی جبهه شعله را تا حدی ضعیف تر می‌کند. علاوه بر این، تقریباً هیچ اثر خاموشی بر روی سرعت نوک شعله مشاهده نمی‌شود زیرا کاهش سرعت جریان گاز با رشد سرعت احتراق گاز خنثی می‌شود. با این حال، انتشار شعله در بخش میانی به دلیل تلفات حرارتی زیاد هنگام برخورد با شبکه سیمی به طور قابل توجهی مهار می‌شود و علاوه بر این، مطابق شکل (۳-۴۱) حداکثر فشار به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.



شکل ۳-۳۹: مش‌های مورد استفاده در آزمایش [۸۳]



شکل ۳-۴۰: تصاویر انتشار شعله در حضور توری‌های سیمی با مش‌های مختلف [۸۳]

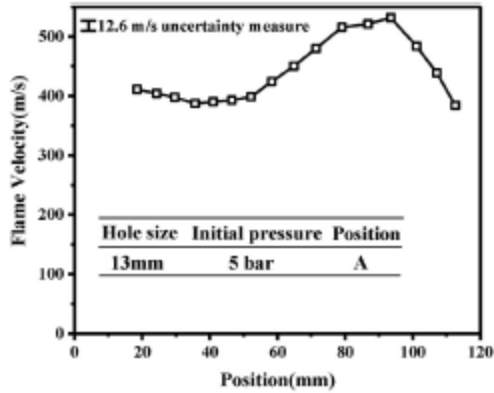


شکل ۳-۴۱: تغییرات فشار محفظه احتراق در حضور توری‌های سیمی با مش‌های مختلف [۸۳]

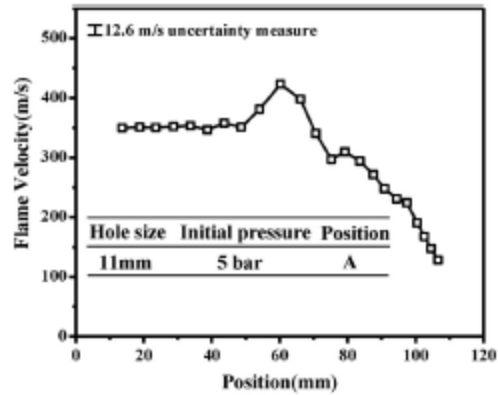
۳-۲-۲۶-وی^۱ و همکاران ۲۰۲۱ [۸۴]

در این مطالعه اثرات اندازه سوراخ و موقعیت صفحه سوراخ دار بر انتشار شعله مخلوط هیدروژن- هوا در شرایط استوکیومتری و جریان و نوسان فشار در یک محفظه احتراق با حجم ثابت با حضور یک صفحه سوراخ دار یک حفره‌ای بررسی شد. در این مطالعه برای ثبت انتشار شعله از روش عکسبرداری شلیرین با سرعت بالا استفاده شد. مطابق شکل (۳-۴۲) نتایج نشان داد که سرعت شعله ابتدا افزایش می‌یابد و سپس با افزایش اندازه سوراخ کاهش می‌یابد به طوری که با اندازه سوراخ ۱۳ میلی‌متر، سرعت شعله و نوسان فشار در شرایط آزمایشی فعلی به حداکثر مقدار خود رسید. علاوه بر این، تأثیر موقعیت صفحه سوراخ شده نیز مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که جریان جت قبل از جبهه شعله زمانی که صفحه سوراخ‌دار در موقعیت‌های A (صفحه سوراخ دار در فاصله ۱۰۵ میلیمتری از دیواره سمت راست) و B (صفحه سوراخ دار در فاصله ۲۲ میلیمتری از دیواره سمت راست) قرار دارد به‌طور برجسته مشخص است و در نتیجه تفاوت ظاهری در شکل شعله در پشت صفحه سوراخ‌دار ایجاد می‌شود، به این معنی که حرکت جریان جت نقش اصلی در توسعه شعله دارد. در موقعیت B، جبهه شعله با جریان جت همپوشانی دارد و به همان شکل است. علاوه بر این در موقعیت B، یک جبهه شعله ثانویه با سرعت نوک شعله بالاتر از جبهه شعله اولیه تحت تأثیر برخورد گرداب‌های شعله ایجاد شد.

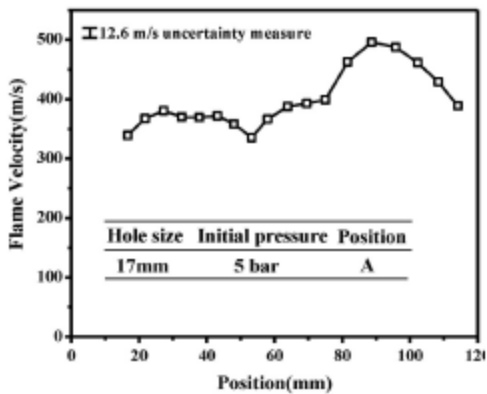
¹ - Wei



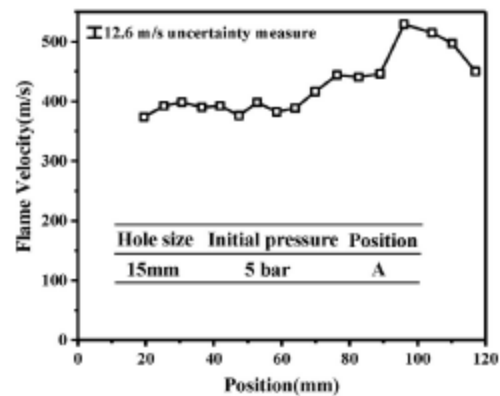
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳-۴: تغییرات سرعت شعله در حضور صفحه سوراخ دار با اندازه منافذ مختلف؛ (الف) ۱۱ میلیمتر، (ب) ۱۳ میلیمتر، (ج) ۱۵ میلیمتر، (د) ۱۷ میلیمتر [۸۴]

در جدول (۳-۱) خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در زمینه احتراق گازها با حضور موانع آورده شده است. در این جدول پارامترهای احتراقی و پارامترهای مربوط به موانع که توسط محققین مختلف مورد مطالعه قرار گرفته، مشخص شده است.

جدول ۳-۱: پارامترهای مورد مطالعه محققان در زمینه بررسی احتراق در محفظه بسته

پارامترهای مربوط به موانع								پارامترهای احتراقی								نام محقق
فاصله بین موانع	تعداد موانع	فاصله تا منبع جرقه	ضخامت	نسبت انسداد	اندازه منافذ	هندسه موانع	جنس	شبه سازی احتراق	خاموشی شعله	تصویربرداری از شعله	نسبت هم ارزی	زمان تأخیر	دمای احتراق	سرعت نوک شعله	فشار محفظه احتراق	
		■			■					■				■	■	Wie et al.
					■					■					■	Jin et al.
							■			■	■		■	■	■	Wang et al.
					■		■			■						Ariff et al.
		■					■			■				■	■	Kolahdoz et al.
		■			■					■				■		Lei et al.
				■	■						■		■		■	Lu et al.
						■				■				■		Lei et al.
					■		■			■	■			■	■	Li et al.
							■		■						■	Bllenoue et al.
									■	■	■				■	Dunn Runkin
	■						■	■	■					■	■	Wen et al.
		■						■			■	■		■	■	Salah et al.
■				■				■		■					■	Tang et al.
■				■						■			■		■	Palecka et al.
						■	■	■							■	Emami et al.
								■					■			Hosseinpoor et al.
							■				■		■			Hashemi et al.

۳-۳- مقایسه بین مطالعات انجام شده و هدف رساله

از مجموعه مطالب این فصل چنین برمی آید که تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه ارزیابی احتراق گازها در حضور موانع و بدون حضور موانع صورت گرفته است. مطالعات انجام شده در ارزیابی احتراق و انفجار گازها را می توان در دو بخش مطالعات عددی و آزمایشگاهی تقسیم بندی کرد. طبق جدول (۱-۳) بیشتر مطالعات انجام شده به بررسی انتشار شعله، سرعت شعله و فشار احتراق پرداخته شده است و توجه کمتری به بحث خاموشی شعله با استفاده از موانع متخلخل و صفحات سوراخ دار شده است. به این ترتیب هدف از این پژوهش، رسیدن به خاموشی شعله با استفاده از موانع متخلخل و صفحات سوراخ دار و بررسی عوامل موثر بر الگوی خاموشی شعله می باشد.

۳-۴- جمع بندی

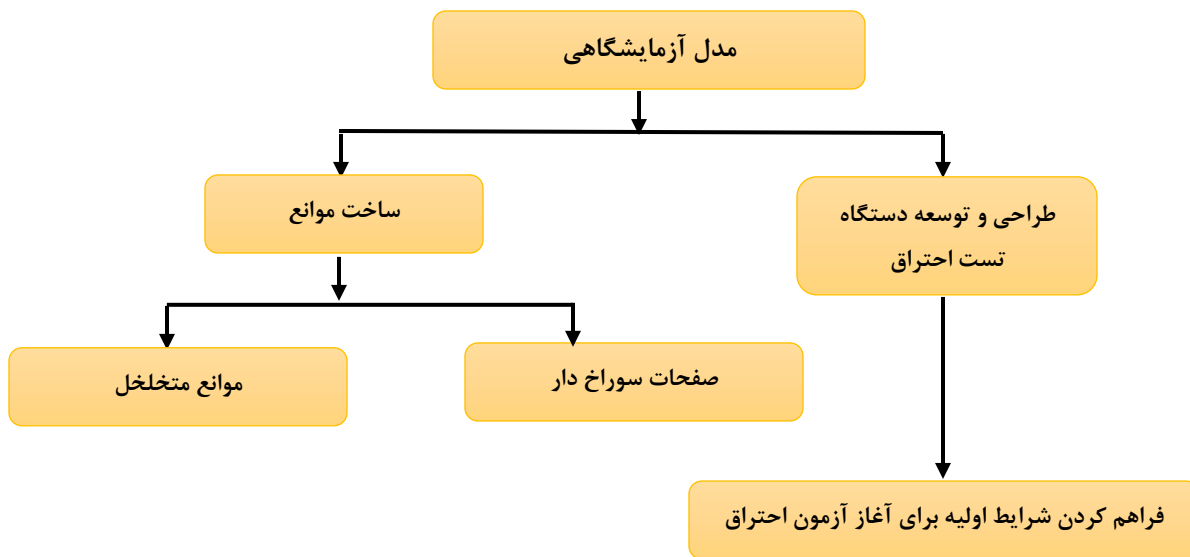
یکی از مخاطراتی که همواره تهدیدی برای صنایع مختلف از جمله صنایع نفت و گاز، پتروشیمی و معادن به شمار می آید، خطر انفجار گازها است؛ لذا ارزیابی و تخمین خطر انفجار گازها به خصوص مخلوط متان و هوا یک نیاز اصلی و اولیه برای توسعه و پیشرفت طرح مدیریت بحران به حساب می آید که باید در تمامی عمر یک صنعت صورت پذیرد. به همین دلیل در این فصل با توجه به اقتضای پژوهش حاضر و دسترسی به منابع علمی معتبر، تحقیقات مختلفی که توسط دانشمندان مختلف در زمینه بررسی احتراق گازها انجام شده است، مورد بررسی قرار گرفت. در تحقیقات انجام شده، تمامی پارامترهای کلیدی مورد توجه قرار داده نشده است و نتایج این تحقیقات در مجموع به یک نتیجه جامع و کاملی برای بررسی خطر احتراق مخلوط گاز متان و هوا نمی انجامد. بدین منظور در فصل بعدی دستگاهی جهت انجام آزمون احتراق طراحی و آماده سازی شده است که بتوان با استفاده از آزمون احتراق در این دستگاه، پارامترهای احتراقی را مورد بررسی قرار داد و شرایط دستیابی به خاموشی شعله را با حضور موانع متخلخل و صفحات سوراخ دار بررسی نمود.

فصل چهارم

(آماده‌سازی مدل آزمایشگاهی جهت انجام آزمون احتراق)

۴-۱- مقدمه

انفجار و احتراق مخلوط گازی پدیده‌ای قابل ملاحظه در صنایع مرتبط با مواد قابل اشتعال است. در این گونه صنایع پیش‌بینی و پیشگیری حوادث و رخداد‌های ناشی از انفجار مخلوط گازی در اطمینان از ایمنی تجهیزات نصب شده حائز اهمیت است [۸۵]. حضور موانع در مسیر جریان و شعله ایجاد شده، سبب تولید گردابه‌هایی در پشت آن‌ها می‌شود. این گردابه‌ها موجب به هم ریختگی و چین و چروک شدن سطح شعله و یا حتی بسته به شدت آشفته‌گی جریان، موجب تقسیم شدن جبهه شعله به جبهه‌های کوچکتر می‌شوند. این موضوع باعث افزایش مساحت سطح شعله و به دنبال آن افزایش سرعت شعله می‌شود. همچنین با ورود گردابه‌های کوچک مقیاس به ساختار شعله (ناحیه پیش گرم و یا حتی ناحیه واکنش)، ضخامت شعله افزایش یافته و نرخ انتقال گرما و جرم به ناحیه پیش گرم شدت می‌یابد. البته ورود گردابه‌هایی با سرعت گردش بالا به درون ساختار شعله بسته به نرخ کرنش محلی ایجاد شده ممکن است باعث ایجاد خاموشی‌های ناحیه‌ای نیز بشود [۸۵]. مطالعه و بررسی نقش موانع در آشفته‌گی سطح شعله و شتاب‌گیری آن در مقیاس بزرگ، به دلیل هزینه بالای آزمایش انفجار مخلوط گازی، با محدودیت‌های بسیاری همراه است. از این رو بیشتر مطالعات انجام شده در این زمینه در مقیاس کوچک و آزمایشگاهی صورت گرفته است. در تحقیق حاضر به منظور بررسی اثر موانع بر احتراق مخلوط متان و هوا محفظه‌ای مورد طراحی، ساخت و توسعه قرار گرفت که در این فصل به توضیح مدل آزمایشگاهی پرداخته می‌شود. در شکل (۴-۱) روند اجرای مدل آزمایشگاهی به جهت شروع آزمون‌های احتراق نشان داده شده است.



شکل ۴-۱: روند اجرای مدل آزمایشگاهی جهت شروع آزمون های احتراق

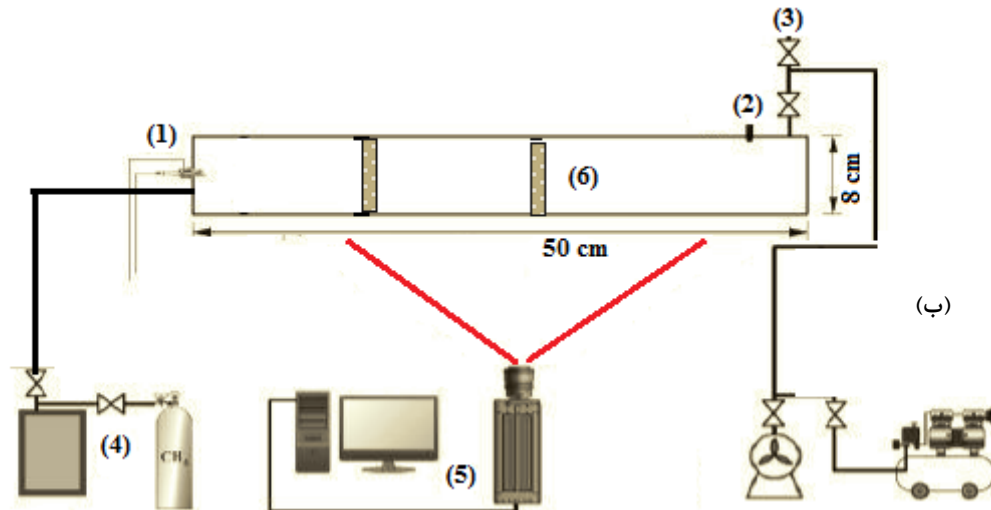
۴-۲- مدل آزمایشگاهی

برای بررسی فرآیند احتراق مخلوط متان و هوا در حضور موانع متخلخل و صفحات سوراخ دار، از مدل

آزمایشگاهی مطابق شکل (۴-۲) استفاده شده است.



(الف)



شکل ۴-۲: الف) نمای واقعی مدل آزمایشگاهی، ب) نمای شماتیکی؛ ۱. سیستم جرقه زنی شامل شمع، ۲. سنسور فشار، ۳. خروجی گاز و خلأ محفظه، ۴. تزریق گاز، ۵. دوربین PCO با سرعت بالا، ۶. صفحات سوراخ دار.

تجهیزات مورد استفاده در این تحقیق به شرح زیر می باشد:

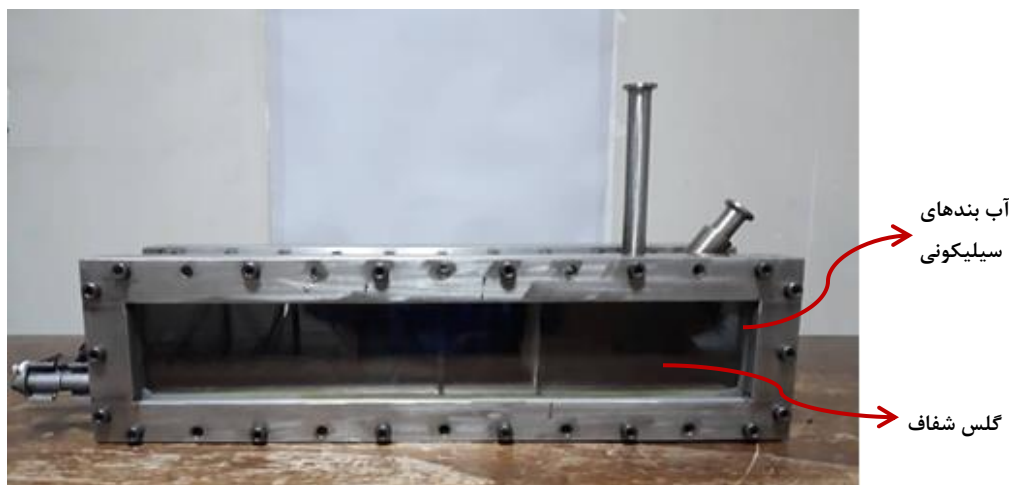
- ۱- محفظه احتراق حجم ثابت
- ۲- سیستم جرقه زنی
- ۳- سیستم سوخت رسانی
- ۴- حسگرهای^۱ اندازه گیری فشار و ثبت کننده اطلاعات^۲
- ۵- شیر تخلیه مخلوط سوخت و هوا
- ۶- سیستم تصویربرداری
- ۷- واحد کنترل الکترونیکی
- ۸- موانع متخلخل و صفحات سوراخ دار

^۱- Sensors

^۲- Data Logger

۴-۲-۱- محفظه احتراق

محفظة مورد استفاده در این تحقیق، به شکل مکعب مستطیل است. این محفظه قبلاً توسط آقای کلاهدوز و همکاران طراحی و ساخت شده بود که در این پژوهش با اعمال تغییرات مکانیکی و الکتریکی توسعه و بهبود داده شد. این محفظه دارای طول ۵۰ سانتی متر، ارتفاع ۸ سانتی متر و عمق ۱۱ سانتی متر است (مدل طراحی شده آن در پیوست (الف) آورده شده است). جنس ورق به کار رفته برای ساخت محفظه، فولاد ضد زنگ ۳۰۴ به ضخامت ۱۵ میلی متر است. سطوح داخلی محفظه با استفاده از سمباده با درجه زبری ۴۰۰ به طور کامل صیقل داده شده است. جهت امکان تصویربرداری از شعله، در یک وجه محفظه (۸×۵۰ سانتی متر) از یک گلس شفاف با ضخامت ۲۰ میلی متر استفاده شده است (شکل ۳-۴). هدف از قرار دادن این گلس شفاف، مشاهده درون محفظه به منظور بررسی پدیده‌هایی همچون پاشش و احتراق است. در اطراف این محفظه از آب‌بندهای سیلیکونی استفاده شده است تا از نشت گازهای داخل محفظه و ورود هوای بیرون در هنگام ایجاد خلأ جلوگیری شود.



شکل ۳-۴: محفظه مورد استفاده جهت اجرای آزمون احتراق

۴-۲-۲- سیستم جرقه زنی

سیستم جرقه زنی وظیفه دارد مخلوط سوخت و هوایی را که وارد محفظه احتراق شده به وسیله تخلیه الکتریکی مشتعل کند. در اثر تخلیه الکتریکی که بین الکترودهای شمع ایجاد می شود باعث داغ شدن شدید قسمتی از مخلوط سوخت و هوای اطراف شمع شده و باعث اشتعال مخلوط موجود در دهانه شمع شده و در نهایت

مخلوط سوخت و هوای داخل محفظه شروع به سوختن می کند. سوختن به سرعت در تمام محفظه پخش و همه مخلوط در زمان بسیار کوتاهی مشتعل می شود. سیستم جرقه زنی شامل سه بخش اصلی به شرح زیر می باشد:

✓ کوئل جرقه زنی^۱

✓ شمع جرقه زنی^۲

✓ دستگاه کنترل کننده

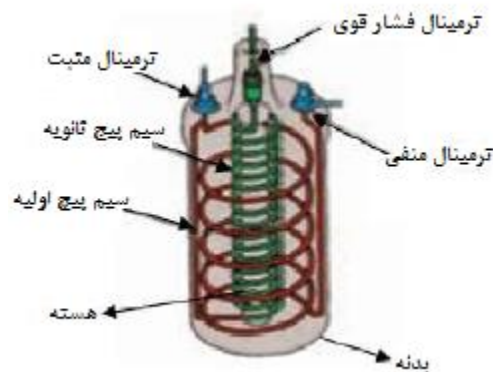
۱- کوئل جرقه زنی

برای ایجاد تخلیه الکتریکی در داخل محفظه، به دلیل بالا بودن میزان فشار محفظه بسته، انرژی با ولتاژ بیش تری نسبت به ولتاژ باتری نیاز است. از این رو کوئل، مقدار جریان را افزایش داده و به تبع آن انرژی مورد نیاز جهت تخلیه الکتریکی در داخل مخلوط سوخت و هوا متراکم شده را فراهم می نماید. ساختمان داخلی کوئل جرقه زنی مطابق شکل (۴-۴) متشکل از بخش های زیر است:

الف) بدنه یا پوسته کوئل

ب) هسته کوئل

ج) سیم پیچ اولیه و ثانویه



شکل ۴-۴: ساختمان داخلی کوئل

^۱- Ignition Coil

^۲- Spark Plug

الف) بدنه یا پوسته کوئل

بدنه یا پوسته کوئل معمولاً از فلزاتی مانند آلایژ آلومینیوم که ضریب انتقال حرارتی بالایی دارند ساخته می شوند. انتقال حرارت از طریق پوسته کوئل باعث خنک شدن بهتر سیم پیچ ها می شود و از آسیب دیدن آنها جلوگیری می کند. معمولاً در داخل پوسته کوئل روغن مخصوص ریخته می شود که ضمن دارا بودن خاصیت هدایت و انتقال حرارت، عایق الکتریسیته نیز است و از اتصال کوتاه شدن حلقه های سیم پیچ جلوگیری می کند.

ب) هسته کوئل

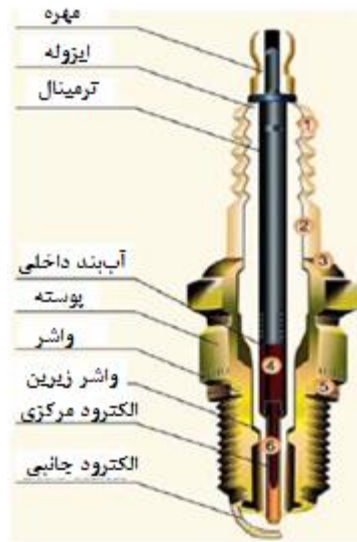
هسته کوئل از ورقه های فولاد آلایژی مانند آلایژ فولاد یا کرم، سیلیسیوم، نیکل و منگنز ساخته می شود. ضخامت ورقه های هسته بین ۰/۵ تا ۱/۵ میلی متر انتخاب و ورقه ها به وسیله لاک یا کاغذ نسبت به هم عایق بندی می شوند. عایق کاری ورقه ها به منظور جلوگیری از گرم شدن هسته کوئل صورت می گیرد.

ج) سیم پیچ اولیه و ثانویه

سیم پیچ اولیه کوئل از ۲۰۰ تا ۳۰۰ حلقه سیم به قطر یک میلی متر تشکیل شده که دارای عایق لاک است. سیم پیچ ثانویه کوئل نیز دارای ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ حلقه به قطر ۰/۱ میلی متر است و با عایق های لاک و لایه های کاغذ بر روی هسته قرار می گیرد.

۲- شمع جرقه زنی

شمع یکی از اجزای اصلی سیستم جرقه زنی است. شمع وظیفه دارد انرژی الکتریکی ایجاد شده در کوئل جرقه زنی را به مخلوط سوخت و هوای داخل محفظه احتراق تخلیه نماید. شمع ها طبق شکل (۴-۵) به طور کلی از چندین بخش تشکیل شده اند.



شکل ۴-۵: ساختمان داخلی شمع جرقه زن

شمع جرقه زن مورد استفاده در این تحقیق، ساخت شرکت بوش^۱ و از نوع ZS- K 1×1 می باشد. در شکل (۴-۶)، کوئل و شمع مورد استفاده در آزمون نشان داده شده است. زمان پر شدن سیم پیچ در اغلب آزمون ها، ۲/۵ میلی ثانیه انتخاب شد و با توجه به این که ولتاژ ورودی به سیم پیچ ۱۲ ولت است. انرژی تأمیننی برای جرقه حدود ۳۰ میلی ژول خواهد بود.



شکل ۴-۶: نمونه ای از شمع و کوئل مورد استفاده در آزمون احتراق

^۱- Bosch

۴-۲-۳- سیستم سوخت رسانی

سیستم سوخت رسانی شامل مجموعه‌ای از قطعات منیفولد هوا و سوخت شامل ریل سوخت، افشانه پاشش سوخت^۱، مسیر هوا و اتصالات مربوطه می‌باشد. این مجموعه بر روی بدنه اصلی محفظه متصل شده است. از این مجموعه جهت پاشش سوخت گاز متان به داخل محفظه و همچنین جهت خروج گازهای حاصل از احتراق به وسیله دمش هوای محیط به داخل محفظه احتراق طراحی و ساخته شده است. به دلیل استفاده از افشانه پاشش سوخت، میزان پاشش گاز به داخل محفظه کاملاً دقیق و تحت کنترل است.

افشانه سوخت مورد استفاده، از نوع افشانه‌ی شش سوراخ تزریق مستقیم (FSI HDEV Gasoline Direct Injection Injectors) ساخته شرکت بوش می‌باشد. این افشانه تا فشار ۱۰۰ بار قابلیت عملکرد دارد. نمایی از این افشانه در شکل (۷-۴) نشان داده شده است.



ب

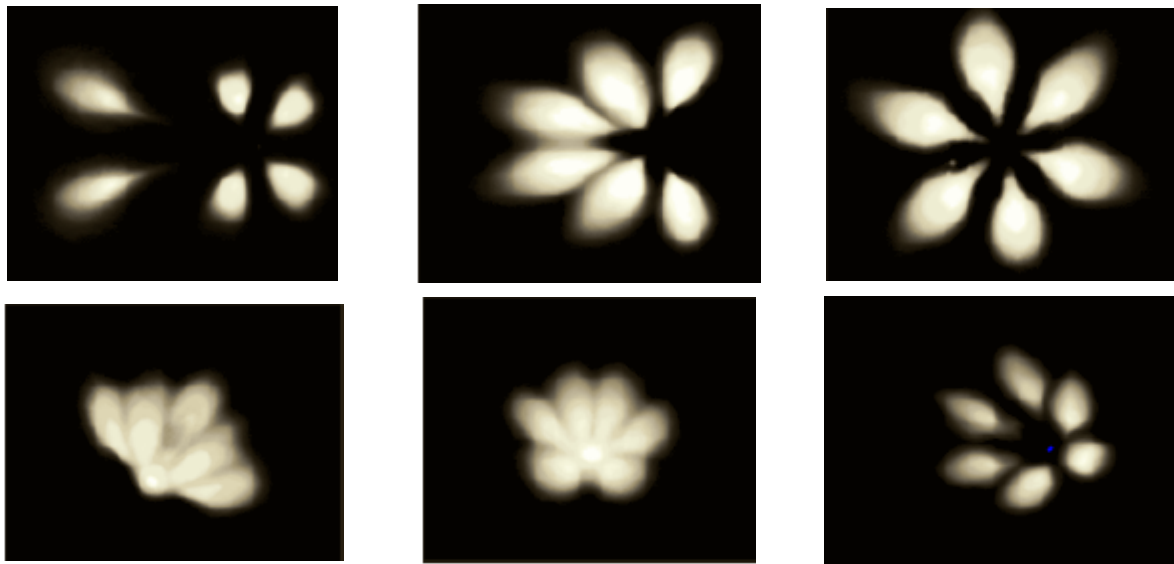


الف

شکل ۴-۷: الف) افشانه پاشش گاز متان، ب) شش سوراخ موجود در افشانه گاز متان

شکل (۸-۴)، حالت‌های پاشش گاز متان را شش سوراخ موجود در افشانه تزریق مستقیم نشان می‌دهد.

¹ - Injector



شکل ۴-۸: حالت های پاشش گاز از افشانه حاوی شش سوراخ تزریق مستقیم

۴-۲-۴- حسگرهای اندازه گیری فشار

در این تحقیق از دو حسگر اندازه گیری فشار استفاده شده است:

- حسگر فشار ۱ بار مدل Wika؛ این حسگر فشار ۰ تا ۱ بار را اندازه گیری می کند و برای تعیین و محاسبه نسبت هم ارزی به صورت هم زمان، میزان فشار داخل محفظه احتراق و پاشش گاز متان را اندازه گیری و گزارش می نماید. این حسگر در فاصله ۱۵ سانتی متری از انتهای سمت راست محفظه نصب شده است و دارای خطای ۰/۵ درصد است.
- سنسور فشار ۱۰ بار مدل Wika؛ این حسگر فشار ۰ تا ۱۰ بار را اندازه گیری می کند برای اندازه گیری فشار حاصل از احتراق که در فاصله ۲۰ سانتی متری از انتهای سمت راست محفظه نصب شده است و زمان واکنش نسبت به تغییرات فشار کوچک تر از ۱ میلی ثانیه است.

برای ثبت اطلاعات در رایانه از ثبت کننده اطلاعات^۱ (ADAM²) مدل ۶۰۱۷ با سرعت ۵۰ میلی ثانیه استفاده شده است. حسگر فشار و دیتا لاگر مورد استفاده در شکل (۹-۴) نشان داده شده است. مشخصات فنی حسگر فشار و ثبت کننده اطلاعات مورد استفاده به ترتیب در پیوست (ب) و پیوست (د) آورده شده است.

همچنین برای ثبت اطلاعات در رایانه و تحلیل داده های ثبت شده از نرم افزار Adam 4000-5000 Utility (Ver 4.00.06) استفاده شده است. حسگر فشار قادر به ثبت جریان ایجاد شده (I) از ۴ تا ۲۰ میلی آمپر است. برای محاسبه فشار حاصل از احتراق از رابطه (۴-۱) استفاده می شود. با توجه به داشتن خطا در وسایل اندازه گیری این مقدار فشار به دست آمده بایستی اصلاح شود که طبق رابطه (۴-۲) فشار اصلاح شده بر حسب بار محاسبه می شود.

$$P_{ex} = \frac{(I-4)}{1.6} \quad (۴-۱)$$

$$P_{cor} = 0.755 \times P_{ex}^{1.15} \quad (۴-۲)$$



شکل ۹-۴: حسگر اندازه گیری فشار احتراق و دستگاه ثبت کننده اطلاعات

^۱- Data Logger

^۲- Advantech's data acquisition modules

۴-۲-۵- سیستم تصویربرداری

با توجه به کوتاه بودن زمان شروع تا پایان احتراق (خاموشی شعله) که در حدود ۶۰ میلی ثانیه به طول می انجامد. باید از دوربینی که قدرت عکسبرداری سریعی داشته باشد استفاده کرد. در این مجموعه برای عکسبرداری از احتراق مخلوط متان و هوا از یک دوربین سرعت بالا مدل PCO.dimax S با سرعت عکسبرداری ۴۵۰۰ فریم بر ثانیه استفاده شده است (شکل ۴-۱۰). دقت دوربین مورد استفاده با تنظیم تعداد عکس بر ثانیه تعیین می گردد. در پژوهش حاضر با توجه به نوع سوخت مورد مطالعه و پدیده مورد نظر از دقت ۱۰۰۰ فریم بر ثانیه استفاده شده است. لازم به ذکر است این دوربین قابلیت عکسبرداری رنگی دارد و مشخصات آن در پیوست (ه) آورده شده است.



شکل ۴-۱۰: دوربین سرعت بالا PCO

۴-۲-۶- واحد کنترل الکترونیکی

با طراحی و ساخت دستگاهی مطابق شکل (۴-۱۱)، کنترل قابلیت پاشش سوخت با فرکانس های زمانی متغیر و همچنین انجام عملیات جرقه جهت ایجاد شعله در محفظه احتراق از فاصله دور توسط اپراتور مهیا شده است. سهولت انجام کار با این سیستم باعث راحتی انجام آزمایش ها می گردد و بروز خطرات احتمالی را کاهش می دهد. استفاده از این دستگاه باعث افزایش دقت و سرعت آزمون های احتراق می گردد. این دستگاه کنترلی از ۴ قسمت تشکیل شده است:

۱- کلید قطع و وصل جریان برق جهت خاموش و روشن کردن دستگاه

۲- کلید تنظیم فرکانس زمانی پاشش سوخت (در واقع یک مقاومت متغیر (پتانسیومتر) جهت افزایش دقت و جلوگیری از افزایش پاشش گاز به داخل محفظه می باشد.

۳- کلید پاشش سوخت جهت اجرای فرمان پاشش سوخت به داخل محفظه

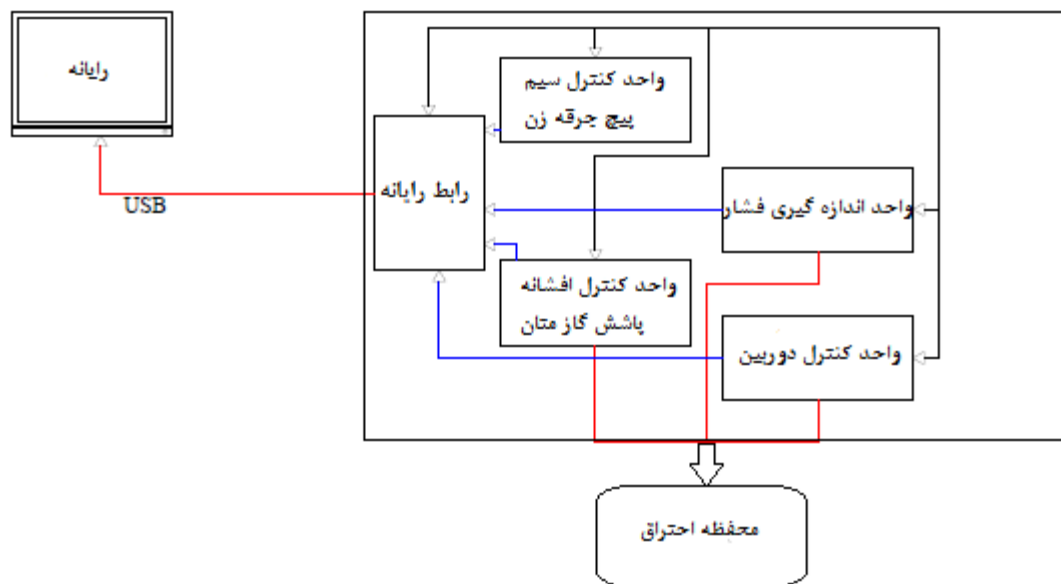
۴- کلید اعمال جرقه جهت انجام و شروع احتراق

به طور کلی فشار درون محفظه بعد از ایجاد جرقه و تشکیل هسته اولیه احتراق و انتشار شعله با گذشت زمان افزایش می یابد.



شکل ۴-۱۱: دستگاه کنترل فرمان شروع جرقه و پاشش گاز متان

مطابق شکل (۴-۱۲)، پس از تنظیم ولتاژ، اعمال دستور پاشش به افشانه داده می شود. بدین ترتیب که ابتدا هوا و سپس گاز متان به داخل محفظه پاشش داده می شود. سپس در مرحله بعد جرقه به سیم پیچ جرقه از طریق واحد کنترل الکترونیکی فرستاده می شود. به طور میانگین در حدود ۵۰ میلی ثانیه زمان لازم است تا شعله شکل گرفته و به دیواره داخلی محفظه اصابت کند.



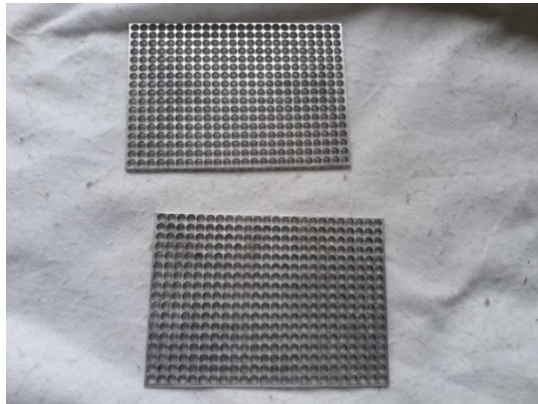
شکل ۴-۱۲: شکل نمادینی از نحوه ارتباط واحد کنترل الکترونیکی با اجزای محفظه احتراق

۴-۲-۷- مانع متخلخل و صفحات سوراخ دار

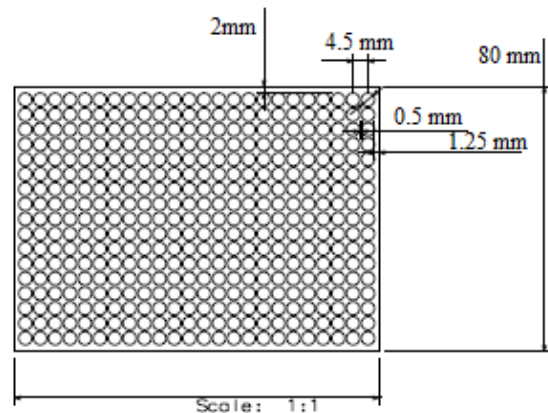
موانع موجود در مسیر جریان احتراق به دو صورت صفحه سوراخ دار و مانع متخلخل طراحی و تهیه شده‌اند. در این پژوهش تمامی موانع از جنس آلومینیوم بوده و دارای طول و عرض (۸×۱۱) سانتی متر و ضخامت یکسان ۲ میلیمتر می‌باشند. صفحات سوراخ دار در قطرهای مختلف ۲، ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر و مانع متخلخل با قطر ۲ میلیمتر طراحی شده است. تمامی این صفحات سوراخ دار و مانع متخلخل دارای تخلخل، اندازه، ضخامت و جنس یکسانی هستند و فقط در تعداد حفره‌ها با توجه به تغییر قطر منافذ متفاوت هستند. همچنین به جهت بررسی تعداد موانع، از هر صفحه سوراخ دار و مانع متخلخل دو نمونه طراحی گردید.

در شکل (۱۳-۴) نمای شماتیک و واقعی موانع متخلخل و صفحات سوراخ دار مورد استفاده نشان داده شده است. مانع متخلخل با استفاده از مدل کلونین طراحی شده است که دارای ساختار منظم می‌باشند و از کنار هم قرار گرفتن 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. صفحات سوراخ دار به صورت منظم توسط ماشین CNC مدل (HUEY LONG) طراحی و اجرا شده است. بر روی این صفحات حفره‌هایی با قطر مختلف ۲، ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر

با دقت $0.3/0$ میلی متر تعبیه و اجرا شده است. جزئیات صفحات سوراخ دار و درصد تخلخل آن ها در جدول (۱-۴) آورده شده است.



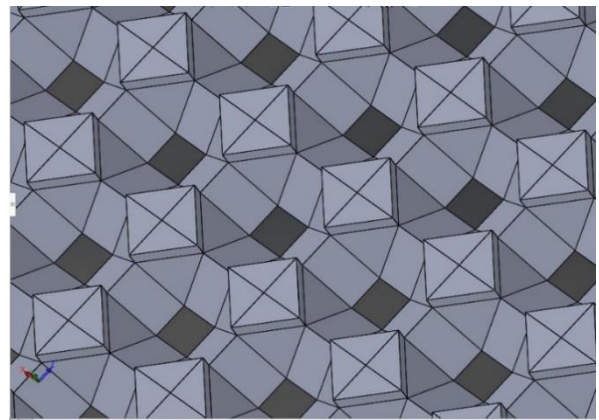
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴-۱۳: نمای شماتیکی و نمای واقعی صفحات سوراخ دار و مانع متخلخل
الف) نمای شماتیکی صفحه سوراخ دار، ب) نمای واقعی صفحه سوراخ دار، ج) نمای شماتیکی مانع متخلخل، د) نمای واقعی مانع متخلخل

جدول ۴-۱: مشخصات صفحات سوراخ دار مورد استفاده در محفظه احتراق

درصد تخلخل (Spore/Stransversal)	تعداد سوراخ ها در هر صفحه	قطر سوراخ ها (میلیمتر)
۴۹	۱۳۳۳	۲
۴۹	۶۸۲	۳
۴۹	۴۰۸	۴
۴۹	۲۶۶	۵

۴-۳- بررسی عدم قطعیت و فاصله اطمینان

وسایل اندازه گیری مورد استفاده شده در این تحقیق عبارت از دو عدد سنسور فشارسنج می باشد. دوربین سرعت بالا با توجه به کیفیت بالای مدل استفاده شده و شرایط نگهداری ویژه آن، که در اتاق مخصوص عکسبرداری نگهداری و استفاده می شود و با تنظیم نرخ تعداد عکس بر ثانیه میزان دقت آن تعیین می گردد. در کار حاضر دقت ۱۰۰۰ فریم بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

حسگر فشار ۱۰ بار نیز با توجه به گواهی تنظیم آن که در پیوست آورده شده است دارای میزان خطای ۰/۲ درصد است که از آن برای سنجش فشار داخل محفظه احتراق استفاده شده است و دقت قابل قبولی دارد. حسگر فشار یک بار که برای تعیین نسبت سوخت و هوا استفاده می شود دارای خطای نیم درصد بوده و با توجه به کیفیت قطعات حسگر، از دقت قابل قبولی برخوردار است.

جهت اطمینان از دقت تمامی وسایل اندازه گیری، هر آزمایش سه بار تکرار شده و با توجه به روابط آماری انحراف استاندارد (SD)، مقدار خطای استاندارد (SE) و فاصله اطمینان (CI) با سطح اطمینان ۹۵ درصد را به کمک روابط (۴-۳) تا (۴-۵) محاسبه کرده و میزان دقت ابزارها و روش کار مشخص می گردد.

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (۳-۴)$$

$$SE = \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (۴-۴)$$

$$CI = SE \times 3.182 \quad (۵-۴)$$

در روابط بالا، $\bar{x}$ مقدار میانگین کمیت، n تعداد دفعات تکرار یک آزمایش است.

عدم قطعیت، میزان خطای وسیله اندازه گیری تقسیم بر بازه اندازه گیری وسیله است. بدین ترتیب عدم قطعیت حسگر فشار ۰ تا ۱ بار، ۰/۵ و عدم قطعیت حسگر فشار ۰ تا ۱۰ بار ۰/۰۲ با سطح اطمینان ۹۵٪ می باشد. همچنین با توجه به عدم قطعیت ابزار و تجهیزات و روش اندازه گیری، به جهت اطمینان از دقت نتایج، هر آزمایش ۳ مرتبه تکرار شده که در هر نمودار مقدار میانگین خطا (Error bar) محاسبه و گزارش گردیده است.

۴-۴: مراحل اجرای احتراق مخلوط متان و هوا در حضور موانع

در شکل (۴-۱۴)، مراحل آماده سازی و انجام آزمون احتراق مخلوط متان و هوا نشان داده شده است. از میان مراحل ذکر شده مهمترین مرحله را می توان تهیه مخلوط مورد نظر دانست که در ادامه به توضیح آن پرداخته شده است.



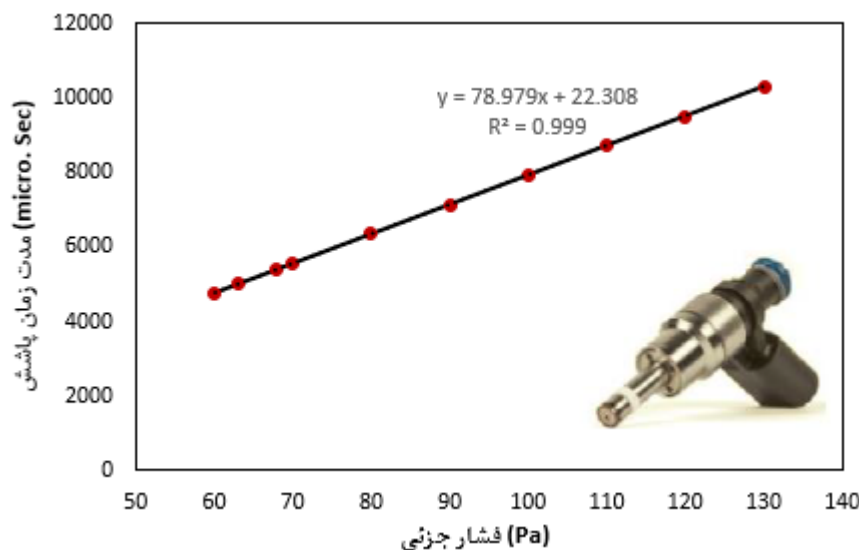
شکل ۴-۱۴: مراحل آماده سازی و انجام آزمون احتراق

۴-۴-۱- ایجاد خلأ در محفظه احتراق

برای اطمینان از خروج گازها از آزمون قبلی، بعد از خالی کردن محفظه با هوای پرفشار، با استفاده از پمپ خلأیی، فشار داخل محفظه تا ۱/۵ کیلو پاسکال (فشار مطلق) کاهش می یابد.

۴-۴-۲- تهیه مخلوط سوخت و هوا

در تحقیقاتی که از روش حجم ثابت استفاده شده، آماده سازی مخلوط سوخت و هوا در یک محفظه اولیه، در دما، فشار و نسبت هم ارزی معین انجام شده و بعد از آن مخلوط به دست آمده به سمت محفظه احتراق هدایت می شود [۸۶ و ۸۷]. در برخی از تحقیقات، سوخت مورد نظر از طریق افشانه تزریق می شود [۸۸]. در تحقیق حاضر که از روش پاشش سوخت متان به داخل محفظه استفاده شد، لازم است زمان باز بودن افشانه متناسب با فشار جزئی مشخص تعیین شود. به همین دلیل باید عملیات تنظیم افشانه با سوخت گازی انجام شده و تابع مربوطه استخراج شود. نمونه ای از این عملیات در شکل (۴-۱۵) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۵: استخراج تابع زمان- فشار جزئی برای سوخت گازی متان

برای تهیه مخلوط سوخت و هوا در نسبت هم ارزی مشخص، از روش فشار جزئی گازها در شرایط ایده آل استفاده می شود. در مخلوط چند گاز در یک محفظه بسته معادلات (۴-۶) تا (۴-۸) براساس الگوی دالتون^۱، حاکم است:

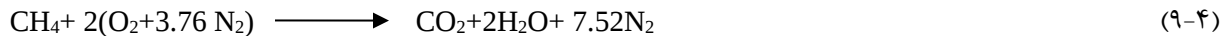
$$V=V_1=V_2=\dots=V_n \quad (۴-۶)$$

$$P=P_1+P_2+\dots+P_n \quad (۴-۷)$$

^۱- Dalton

$$X_i = n_i/n_t = P_i/P_t \quad (۴-۸)$$

در روابط فوق، V حجم، P فشار، X_i کسر مولی جزء i و ۱ تا n اندیس گازهای موجود در مخلوط می باشد. با توجه به رابطه ۴-۱۰، فشار هر جزء با ضرب فشار کل در کسر مولی حاصل خواهد شد [۸۹]. مخلوط گازی مورد نظر برای این آزمایش مخلوط متان و هوا خواهد بود که واکنش یک مرحله ای آن به صورت زیر است:



تمامی آزمایش ها برای مخلوط مورد نظر در نسبت هم ارزی یک انجام خواهد شد. برای آماده سازی مخلوط برای شرایط دلخواه می توان با فرض گاز ایده آل از فشارهای جزئی برای میزان تزریق گاز استفاده کرد که به می توان به طبق معادلات (۴-۱۰) و (۴-۱۱) کسر مولی هوا و متان را محاسبه کرد:

$$P_{\text{CH}_4} = X_{\text{CH}_4} \times P_t \quad (۴-۱۰)$$

$$P_{\text{air}} = X_{\text{air}} \times P_t \quad (۴-۱۱)$$

X کسر مولی گونه های شیمیایی است که در حالت استوکیومتری برای متان و هوا مخلوط مورد نظر به صورت زیر خواهد بود:

$$X_{\text{CH}_4} = n_{\text{CH}_4} / n_t = 1/10.52 = 0.095$$

$$X_{\text{air}} = n_{\text{air}} / n_t = 9.52/10.52 = 0.905$$

بنابراین در نسبت هم ارزی ۱، میزان متان مورد استفاده در محفظه ۹/۵ درصد و ثابت است. همانطور که گفته شد، برای اندازه گیری فشار جزئی از حسگر فشار ۱ بار استفاده شده است. این حسگر ساخت شرکت Wika بوده و محدوده اندازه گیری آن، ۰ تا ۱ بار مطلق است. دقت این حسگر در محدوده اندازه گیری مورد نظر ۰/۲۵ ± درصد بوده است.

بنابراین با استفاده از معادلات ذکر شده و دانستن درصد مولی سوخت متان و هوا، فشار جزئی متان و هوا را در فشار اولیه ($P_T = P_{\text{mix}}$) و نسبت هم ارزی مشخص محاسبه خواهد شد. با فشار جزئی به دست آمده، مدت زمان

پاشش افشانه سوخت متان از طریق نمودار موجود در شکل (۴-۱۵) به دست آورد. با توجه به مطالب ذکر شده فشار جزئی سوخت متان و هوا مطابق جدول (۴-۲) خواهد بود.

جدول ۴-۲: فشارهای جزئی سوخت متان و هوا در فشار اولیه و نسبت هم ارزی ۱

$\phi = 1$		
فشار اولیه مخلوط P_T (bar)	فشار جزئی هوا P_{air} (bar)	فشار جزئی متان P_{CH_4} (bar)
۰/۹۶۴	۰/۸۷۲	۰/۰۹۲

با به دست آوردن فشار جزئی سوخت متان و هوا، تزریق متان به داخل محفظه صورت می گیرد. برای اطمینان از اختلاط کامل و همگن سوخت و هوا، مدت ۱۰ دقیقه فرصت داده می شود و بعد دستور جرقه ارسال و احتراق آغاز می شود. با مهیا کردن شرایط اولیه آزمون احتراق، می توان به بررسی احتراق مخلوط متان و هوا پرداخت که در فصل آینده نتایج حاصل از آزمون احتراق در شرایط مختلف آورده است.

۴-۵- جمع بندی

در این فصل به توضیح آماده سازی دستگاه آزمون احتراق پرداخته شد و لوازم مورد استفاده و مراحل مورد نیاز برای شروع احتراق مورد بحث و بررسی قرار گرفت. همچنین مشخصات موانع متخلخل و صفحات سوراخ دار مورد بررسی قرار گرفت. در فصل آینده به بررسی و تحلیل نتایج حاصل از احتراق مخلوط متان و هوا پرداخته خواهد شد.

فصل پنجم

تحلیل نتایج حاصل از آزمون احتراق

۵-۱- مقدمه

احتراق در محیط‌های متخلخل به طور جدی از دهه ۶۰ میلادی به بعد مورد توجه قرار گرفت. ایجاد اغتشاش در جریان احتراقی، اختلاط بهتر سوخت و هوا و بهبود مکانیزم احتراق در شعله‌های پیش مخلوط از اهداف اولیه به کارگیری محیط متخلخل در احتراق است. نحوه انتقال حرارت در محیط‌های معمولی از طریق جابه‌جایی است که توسط محصولات احتراق انجام می‌شود. در حالی که در محیط‌های متخلخل علاوه بر جابه‌جایی، مکانیزم‌های هدایت و تابش نیز نقش عمده‌ای در انتقال حرارت ایفا می‌کنند. اجسام متخلخل دارای ضریب هدایت حرارتی بالاتری هستند. سطح تماس زیاد ماده متخلخل موجب انتقال گرمای مؤثر بین جامد و گاز می‌شود و اختلاط خوب سوخت و اکسید کننده موجب نفوذ و انتقال گرمای مؤثر در فاز گازی می‌گردد، بنابراین انتقال حرارت در جهت جریان مخلوط گاز از محصولات احتراق به مواد نسوخته میسر شده و منجر می‌شود تا دمای مخلوط نسوخته به دمای اشتعال برسد. بالا بودن ضریب هدایت حرارتی محیط متخلخل علاوه بر این که موجب افزایش انتقال حرارت از منطقه واکنش می‌شود، موجب کاهش دمای بیشینه شعله نیز می‌شود. کاهش دمای بیشینه شعله منجر به کاهش آلاینده‌های از قبیل CO و NO_x می‌گردد [۹۰]. لذا در این فصل با استفاده از آزمون احتراق در دستگاه مورد نظر که در فصل قبل به آن پرداخته شد، تأثیر حضور موانع متخلخل و صفحات سوراخ دار مورد بررسی قرار

گرفت. برای اطمینان از صحت کارکرد مجموعه آزمایشگاهی، برای هر حالت، آزمایش‌ها سه مرتبه تکرار شده‌اند و میانگین نتایج حاصل از تکرار آزمایش‌ها به عنوان نتیجه نهایی ثبت شده است.

۵-۲- ارزیابی احتراق مخلوط گاز متان - هوا در یک محفظه بسته

در این تحقیق، به منظور ارزیابی خطر احتراق مخلوط گاز متان و هوا و تأثیر پارامترهای مختلف بر پارامترهای احتراقی و خاموشی شعله آزمایش شده است. حالت‌های مختلف آزمایش شده در جدول ۵-۱ آورده شده است.

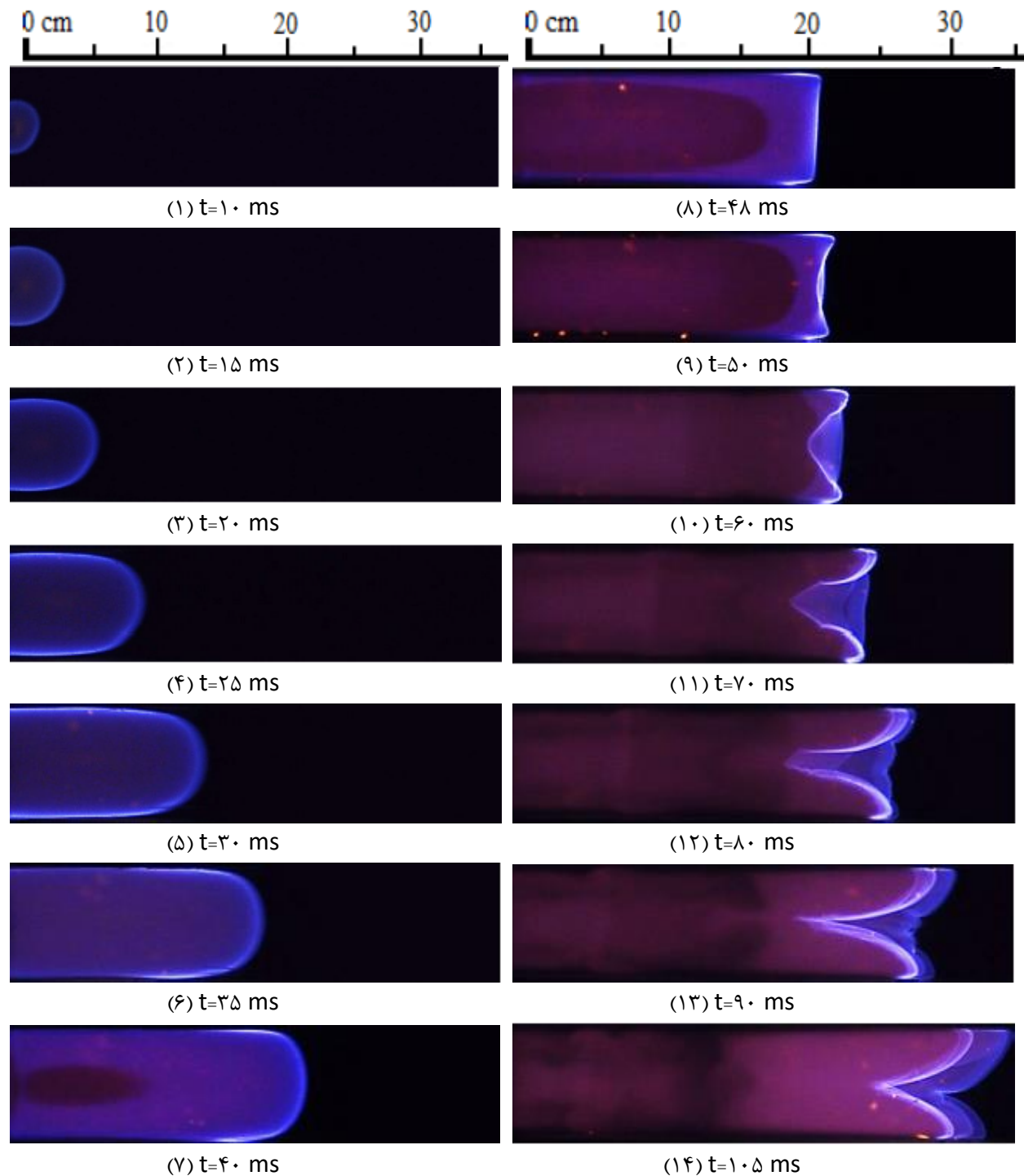
جدول ۵-۱: حالت‌های مختلف آزمایش شده در تحقیق

ردیف	حالت‌های مختلف آزمایش جهت بررسی پارامترهای احتراق مخلوط متان و هوا	
	بدون حضور موانع	با حضور موانع
۱	بررسی تصاویر شعله	بررسی تأثیر تعداد موانع
۲	بررسی سرعت شعله	بررسی تأثیر قطر موانع
۳	بررسی فشار محفظه احتراق	بررسی تأثیر ضخامت موانع
۴	-	بررسی تأثیر تغییر نسبت هم ارزی
۵	-	بررسی تأثیر تغییر فشار اولیه مخلوط
۶	-	بررسی تأثیر فاصله موانع از جرقه
۷	-	بررسی تأثیر فاصله موانع از یکدیگر

۵-۳- ارزیابی احتراق مخلوط گاز متان - هوا بدون حضور موانع

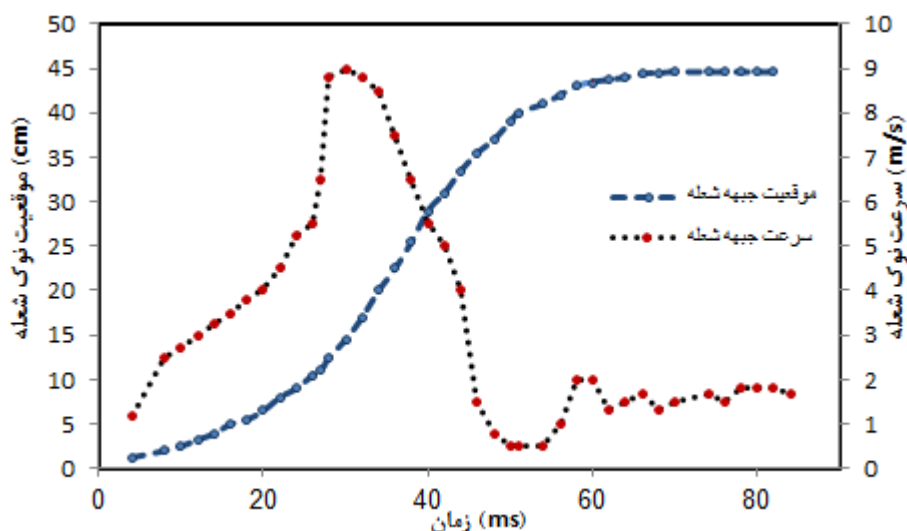
شکل ۵-۱ تصاویر حاصل از عکس‌برداری از فرآیند انتشار جبهه شعله مخلوط استوکیومتری متان - هوا را در شرایطی که اتاق تاریک است، نمایش می‌دهد. نتایج روند تشکیل و انتشار شعله را که شامل تشکیل حالت شعله کروی، حالت انگشتی، حالت تخت و تشکیل شعله لاله‌گون نشان می‌دهد که با نتایج مشابه [۸۰ و ۹۱-۹۵] هم‌خوانی داشته و براساس نتایج ماتالون [۹۱] تخت شدن شعله در وسط محفظه در فاصله ۲۵ سانتی‌متری از ابتدای محفظه رخ داده است. ابتدا شعله به صورت کروی تشکیل شده و پس از برخورد با دیواره‌های محفظه حالت انگشتی به خود گرفته و در مرحله بعد شعله به صورت کشیده درآمده و در زمان ۴۸ میلی‌ثانیه جبهه شعله به

طور کامل تخت شده و فرآیند وارونگی شعله (تشکیل شعله لاله گون) آغاز می‌گردد. در ادامه پیشرفت شعله، شعله لاله گون در جبهه شعله در محدوده زمانی ۸۰ میلی ثانیه به طور کامل تشکیل شده است.



شکل ۵-۱: روند انتشار شعله مخلوط متان و هوا در یک محفظه بسته بدون حضور موانع

به جهت بررسی پارامترهای مهم شعله مانند جبهه شعله و سرعت نوک شعله مبنای محاسبات بیرونی‌ترین قسمت شعله مد نظر قرار گرفته است. همان طور که در شکل (۵-۱) مشاهده می‌شود، لبه بالایی شعله لاله‌گون از لبه پایینی آن مقدار کمی جلوتر است و با نتایج [۹۲] هم‌خوانی دارد. با توجه به نتایج دان-رانکین [۵۴]، سرعت واکنش نسبتاً کند گاز متان و هوا و همچنین ابعاد محفظه در پژوهش حاضر باعث جلوزدگی لبه بالایی شعله شده که امکان تأثیر نیروی شناوری بر پدیده مورد نظر را فراهم کرده و شکل جبهه شعله به حالت فوق در آمده است. شکل (۵-۲) موقعیت جبهه و سرعت نوک شعله (بیرونی‌ترین قسمت شعله) را بر حسب زمان نشان می‌دهد. در زمان ۵۱ میلی‌ثانیه و موقعیت شعله در فاصله ۲۵ سانتی‌متری از سیستم جرقه شیب خط تقریباً صفر شده که نشان دهنده توقف شعله به طور لحظه‌ای بوده و با توجه به شکل شعله، همان آغاز برگشت جبهه شعله و مقدمه تشکیل شعله لاله‌گون است. شعله در ابتدای تشکیل با سرعت ۱/۳۳ متر بر ثانیه شروع به رشد کرده و از زمان ۱۵ تا ۳۰ میلی‌ثانیه با شتاب ثابت رشد کرده و حداکثر سرعت شعله به ۹ متر بر ثانیه می‌رسد. در ادامه شتاب جبهه شعله منفی شده و سرعت جبهه تا مقدار نزدیک به صفر میل می‌کند. پدیده برگشت شعله همگام با توقف لحظه‌ای شعله اتفاق می‌افتد و در ادامه جبهه شعله به شکل لاله‌گون با سرعت تقریبی ۱/۸ متر بر ثانیه به پیشروی خود ادامه می‌دهد.



شکل ۵-۲: موقعیت و سرعت نوک شعله بر حسب زمان

با توجه به تعریف عدد فرود^۱ طبق رابطه (۵-۱) [۹۴]:

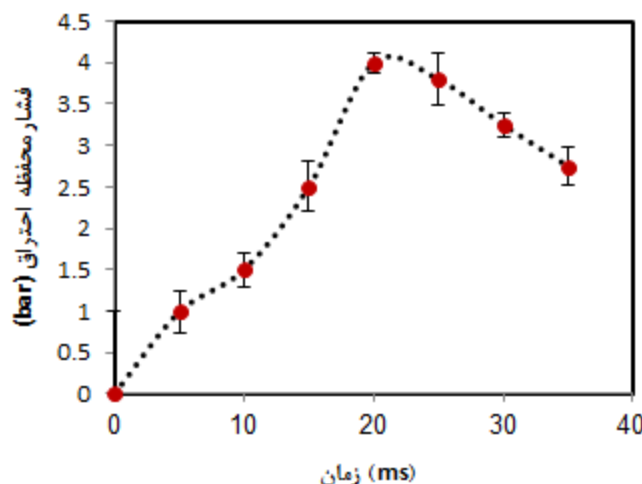
$$Fr = \frac{v}{\sqrt{Lg}} \quad (۵-۱)$$

که در آن g شتاب گرانش زمین ($g=۹/۸۱ \text{ m/s}^2$)، L عمق محفظه ($L=۰/۱۱ \text{ m}$) و v نیز سرعت جبهه شعله ($v=۱/۸ \text{ m/s}$) است. بنابراین عدد فرود برای این شرایط برابر $۰/۳۳۳$ خواهد شد. چون عدد فرود کوچکتر از یک است، انتقال گرما از طریق جابه جایی^۲ صورت گرفته است. مقدار عدد فرود محاسبه شده هم خوانی خوبی با عدد فرود بحرانی محاسبه شده توسط جین و همکاران ($Fr=۰/۳$) دارد که برای مخلوط متان و هوا محاسبه کرده‌اند [۹۴]. شکل (۵-۳) تغییرات فشار میانگین داخل محفظه را بر حسب زمان نشان می‌دهد. این نمودار، میانگین فشار محفظه احتراق در سه بار تکرار آزمایش‌هاست و همچنین با فاصله اطمینان ۹۵ درصد ترسیم شده است. هم‌خوانی نتایج در سه دفعه تکرار آزمایش نشان دهنده دقت قابل قبول برای ابزارهای اندازه‌گیری به کار رفته و همچنین روش تزریق گاز و سیستم جرقه زنی نیز است.

حداکثر فشار محفظه احتراق در طی این فرآیند ۴ بار است که با مطالعه دان-رانکین [۵۴] انطباق بسیار خوبی دارد که دلیلی بر صحت ابزارهای اندازه‌گیری و مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده دارد.

^۱- Froude number

^۲- Convection

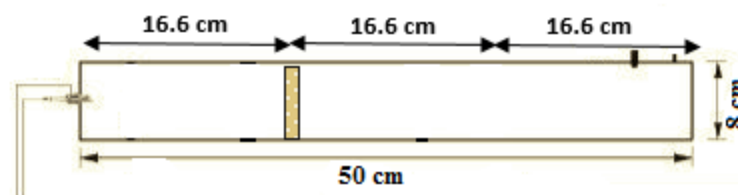


شکل ۵-۳: نمودار تغییرات فشار داخل محفظه بر حسب زمان

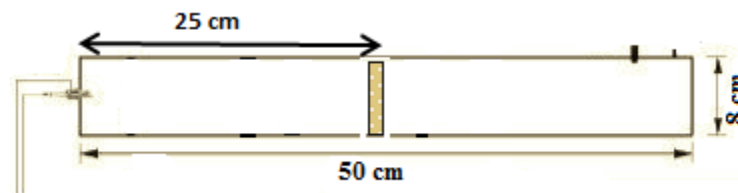
۵-۴- ارزیابی احتراق مخلوط گاز متان - هوا با حضور صفحات سوراخ دار

در این بخش تأثیر حضور موانع سوراخ دار و همچنین تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل تعداد موانع، قطر موانع، تعداد حفره، ضخامت موانع و غیره مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای بررسی هر یک از این عوامل ۳ موقعیت مطابق شکل (۵-۴) در نظر گرفته شده است.

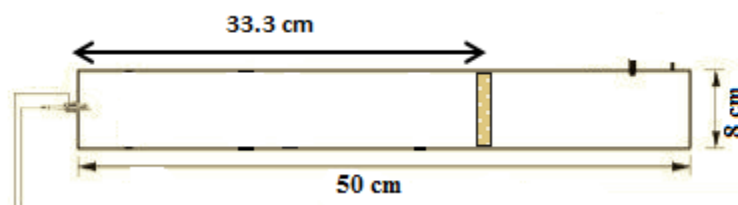
در این شکل موقعیت‌های قرارگیری صفحات سوراخ دار و موانع متخلخل در محفظه بسته نشان داده شده است. در موقعیت (۱)، محفظه به سه قسمت مساوی تقسیم شده و مانع در قسمت اول یعنی در فاصله ۱۶/۶ سانتی‌متری از یکدیگر قرار دارند. در موقعیت (۲)، مانع در میانه محفظه یعنی در فاصله ۲۵ سانتی‌متری از جرقه قرار دارد و در موقعیت (۳)، مانع در فاصله ۳۳/۳ سانتی‌متری از جرقه قرار گرفته است.



حالت (۱)



حالت (۲)

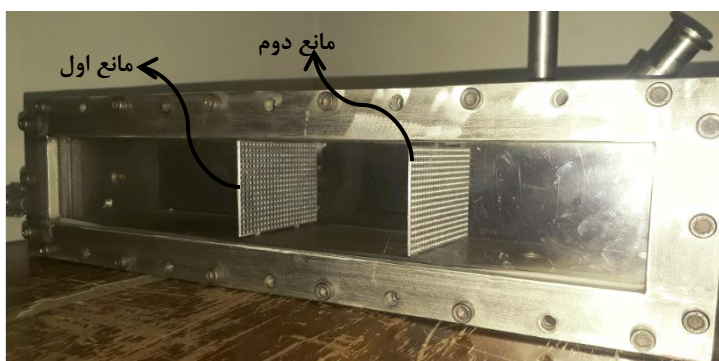


حالت (۳)

شکل ۴-۵: حالت‌های آزمایش شده با حضور موانع

۵-۴-۱- بررسی تأثیر تعداد موانع بر رفتار شعله

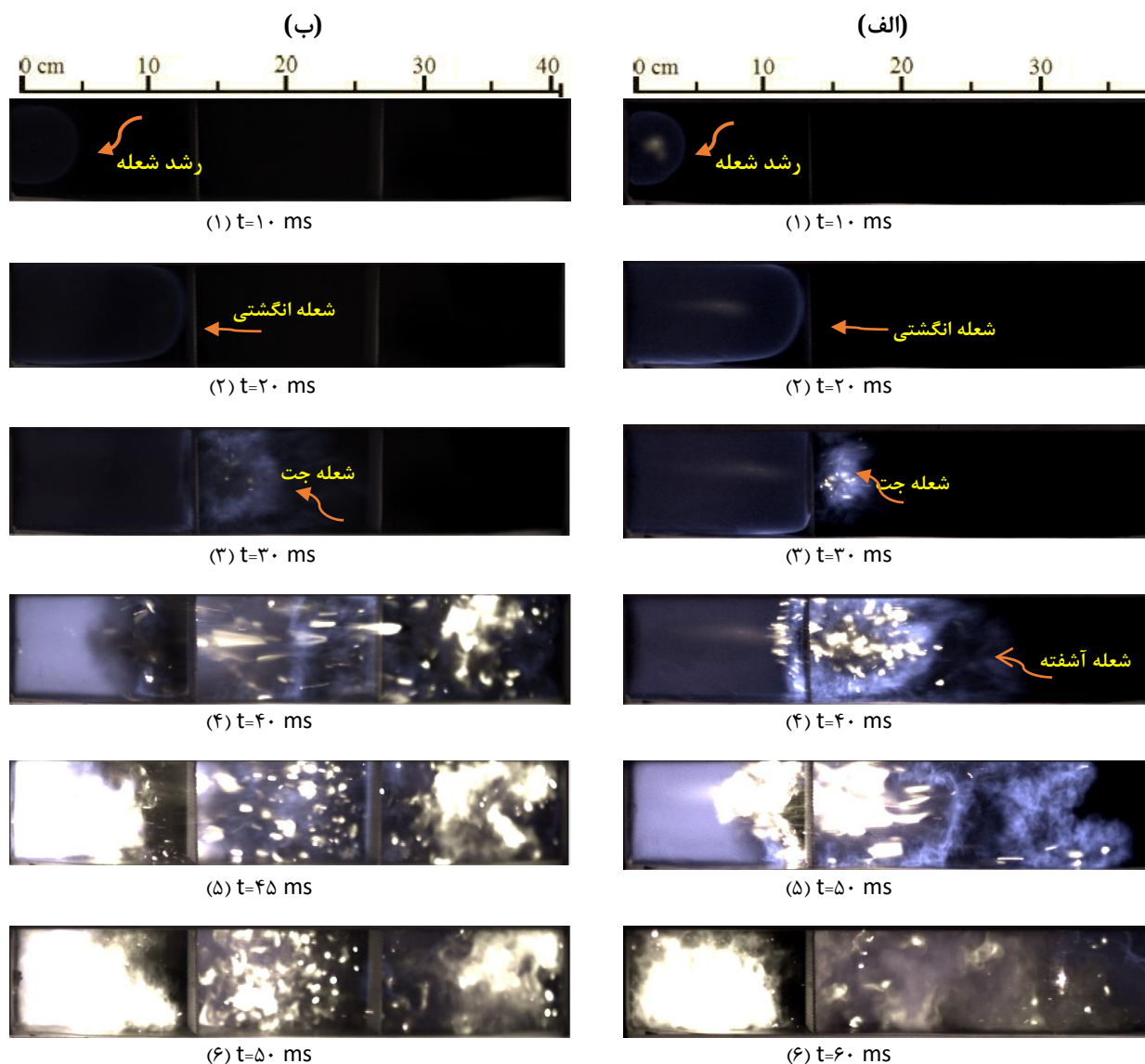
برای بررسی تأثیر تعداد موانع بر انتشار شعله و پارامترهای احتراقی، ابتدا در داخل محفظه احتراق یک صفحه سوراخ‌دار با قطر منافذ ۵ میلی‌متر در فاصله ۱۶/۶ سانتی‌متری از سیستم جرقه قرار داده شد و در حالت بعدی مطابق شکل (۵-۵) مانع مشابه دیگری در فاصله ۳۳/۳ سانتی‌متری از محفظه بسته قرار داده شد.



شکل ۵-۵: نحوه قرارگیری موانع در محفظه احتراق

شکل (۵-۶) تصویر انتشار شعله را با حضور یک مانع در قسمت (الف) و با حضور دو مانع در قسمت (ب)

نشان می‌دهد.



شکل ۵-۶: روند انتشار شعله مخلوط متان و هوا در یک محفظه بسته؛

(الف) با حضور یک مانع، (ب) با حضور دو مانع مشابه

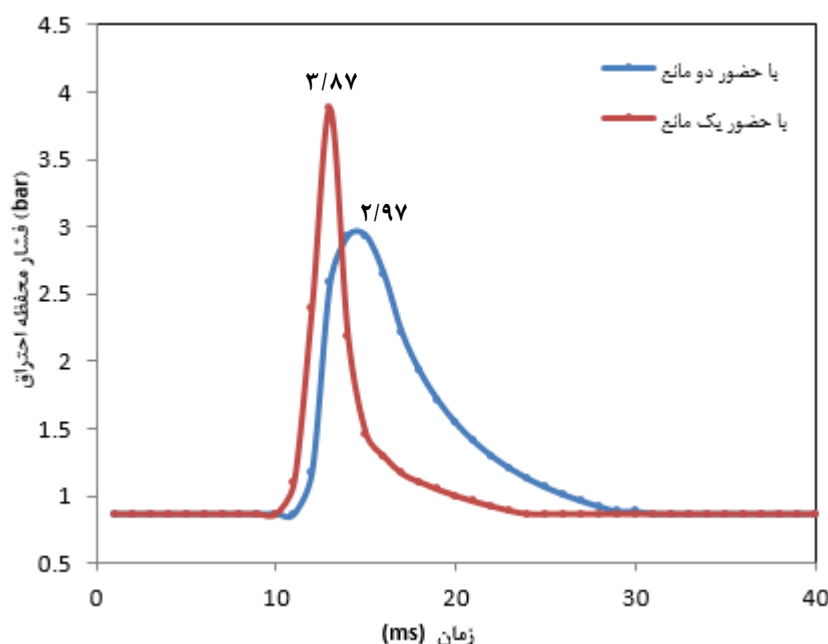
طبق نتایج مشاهده شده از شکل (۵-۶)، اثر تعداد موانعها از قاب (۴ تا ۶) قابل مشاهده است. در قسمت (الف)

هنگامی که شعله به صفحه سوراخ دار اول برخورد می‌کند در زمان ۳۰ میلی‌ثانیه از حالت انگشتی به شعله جت

تبدیل شده و سپس شکل شعله آشفته به خود گرفته و در طول محفظه انتشار می‌یابد و پس از گذشت ۵۰ تا ۶۰

میلی ثانیه پس از برخورد به انتهای محفظه خاموش می‌شود. ولی در قسمت (ب) هنگامی که شعله جت پس از برخورد به مانع اول تشکیل می‌گردد در مدت زمان کوتاهی مجدد به مانع دوم برخورد کرده و به صورت ترکیبی از شعله جت و آشفته انتشار می‌یابد. در نتیجه مطابق با نتایج مطالعه [۹۶] و پژوهش حاضر، با افزایش تعداد مانع میزان آشفته‌گی شعله به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. همچنین زمان رسیدن شعله به انتهای محفظه با موانع بیشتر کوتاه‌تر است. به عنوان مثال، زمانی که شعله به انتهای محفظه می‌رسد و خاموش می‌گردد حدود ۵۰ میلی ثانیه بوده که ۱۰ میلی ثانیه کمتر از حالتی است که یک مانع در محفظه وجود دارد.

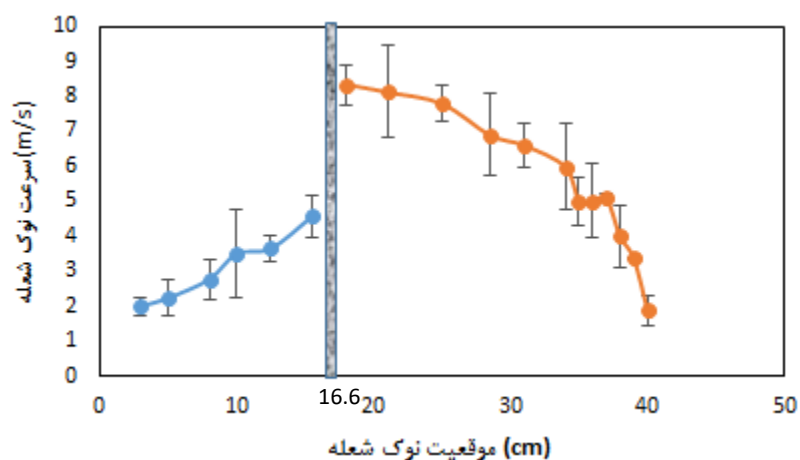
شکل (۵-۷) و (۵-۸) به ترتیب تغییرات فشار محفظه احتراق و سرعت انتشار نوک شعله را در دو حالت حضور یک مانع و دو مانع نشان می‌دهد. در حالت وجود دو مانع سرعت نوک شعله افزایش یافته و فشار حاصل از احتراق نسبت به حالت یک مانع کاهش یافته است.



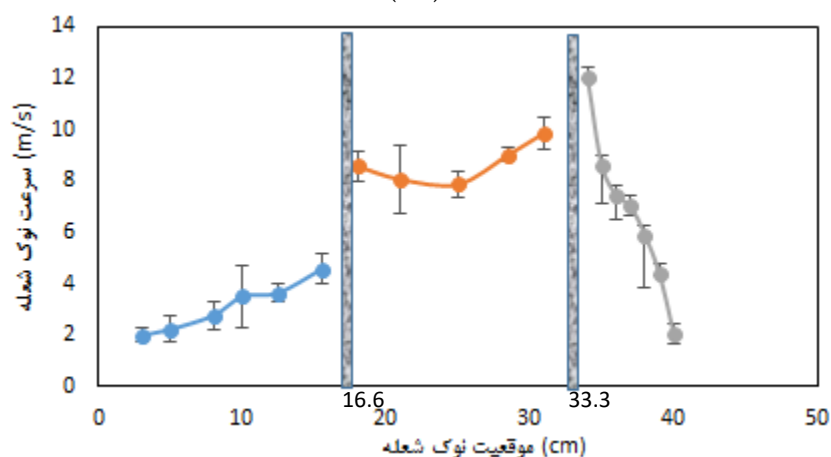
شکل ۵-۷: نمودار تغییرات فشار داخل محفظه بر حسب زمان با تکرار موانع

طبق نتایج به دست آمده هنگامی که در محفظه یک مانع وجود دارد، فشار محفظه احتراق ۳/۸۷ بار و بیش‌ترین سرعت متوسط انتشار شعله حدود ۸/۳۴ متر بر ثانیه می‌باشد. در حالی که با افزودن مانی دیگر در

فاصله ۳۳/۳ سانتی متری از سیستم جرقه، حداکثر فشار محفظه احتراق و سرعت نوک شعله به ترتیب به ۲/۹۷ بار و ۱۱/۹۸ متر بر ثانیه رسیده است.



(الف)



(ب)

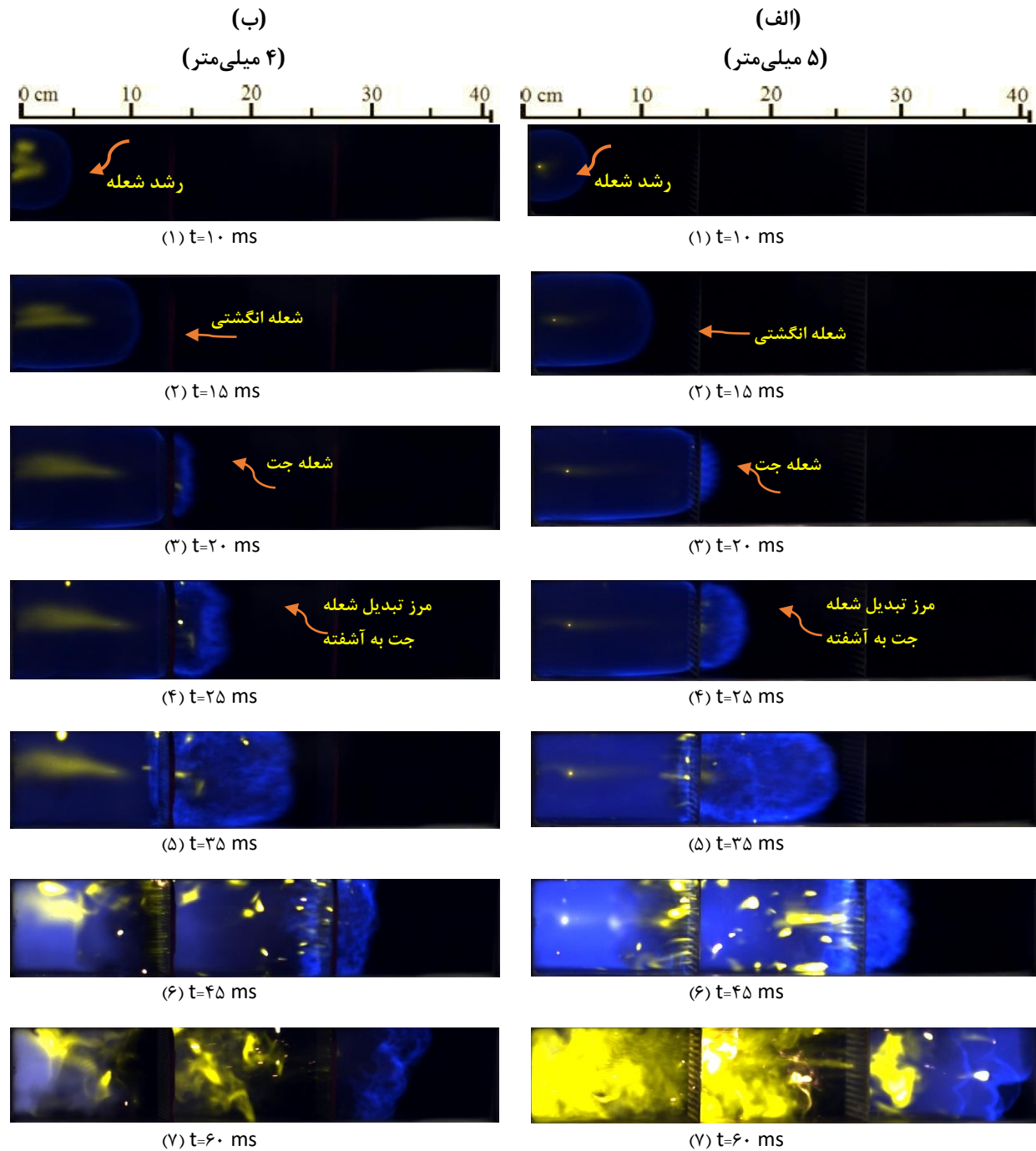
شکل ۵-۸: نمودار تغییرات سرعت نوک شعله؛ الف) با حضور یک مانع ب) با حضور دو مانع یکسان

این نمودار به وضوح نشان می‌دهد که وجود موانع در طول مسیر شعله منجر به افزایش قابل توجه سرعت شعله می‌شود. این بدان معناست که هر چه تعداد موانع در مسیر شعله بیشتر باشد، سبب کاهش موج فشاری شده و فشار محفظه احتراق کاهش می‌یابد. از طرف دیگر طبق نظریه لوئیز [۲۴] که در فصل دوم به آن اشاره شد، به دلیل تقسیم شعله به جبهه‌های کوچکتر، سرعت و شتاب شعله افزایش می‌یابد.

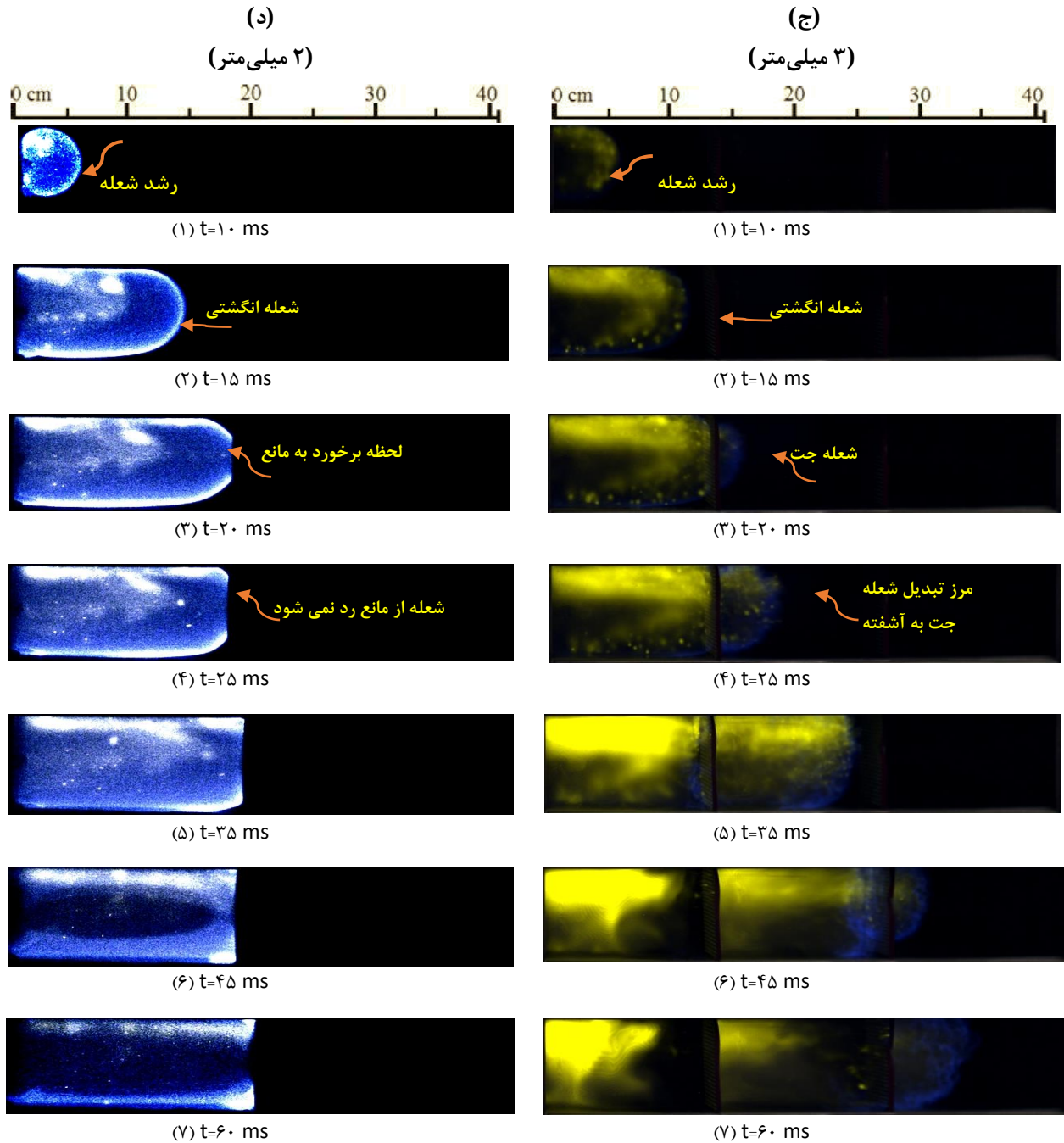
۵-۴-۲- بررسی تأثیر قطر موانع بر رفتار شعله

برای بررسی تأثیر قطر صفحات سوراخ دار بر روند انتشار شعله، احتراق مخلوط گاز متان و هوا در نسبت هم ارزی ثابت ۱، با استفاده از صفحات سوراخ دار با اندازه منافذ ۲، ۳، ۴ و ۵ میلی متری در حالت حضور دو مانع مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۵-۹) روند انتشار شعله با حضور صفحات سوراخ دار با اندازه منافذ مختلف را نشان می دهد. لازم به ذکر است که دو مانع استفاده شده در محفظه دارای اندازه منافذ یکسان هستند.

با توجه به نتایج به دست آمده، انتشار شعله به سه شکل شعله آرام، جت و شعله آشفته قابل مشاهده است. شعله آرام تولید شده به صورت یک شعله انگشتی شکل (شکل (۵-۹) در زمان ۱۵ میلی ثانیه) پس از برخورد به صفحه سوراخ دار فشرده شده و به چندین شعله جت تقسیم می شود (مورد الف تا ج شکل (۵-۹) در زمان ۲۰ میلی ثانیه) و باعث تأخیر در احتراق قبل از عبور شعله از اولین صفحه سوراخ دار می گردد. در این مرحله، سطح شعله به سرعت افزایش می یابد زیرا جبهه شعله در حال مصرف مخلوط در گرداب های ایجاد شده پشت موانع توسط انبساط حجمی مخلوط سوخته است. با عبور شعله از اولین صفحه سوراخ دار، سرعت نوک شعله در مرحله شعله جت افزایش می یابد و تبدیل به شعله آشفته می گردد (مورد الف تا ج شکل (۵-۹) در زمان ۲۰ میلی ثانیه). در واقع یک جریان جت قدرتمند در جهت انتشار شعله تولید می شود و سبب انتشار سریع تر نوک شعله می شود. همانطور که از این تصاویر شکل (۵-۹) مورد الف تا ج مشاهده می شود از ۴۵ میلی ثانیه تا ۶۰ میلی ثانیه، گازهایی که از صفحه متخلخل عبور می کنند ابتدا آبی به نظر می رسند و سپس به رنگ نارنجی و زرد تبدیل می شوند. طبق مقیاس رنگی مورد بررسی شعله در مطالعه ون و همکاران [۹۶]، قسمت هایی از شکل که نارنجی و زرد به نظر می رسد مربوط به واکنش شعله با گازهای نسوخته در دمای بالا و قسمت های آبی مربوط به شعله های آتش در مرحله واکنش اولیه است.



شکل ۵-۹: روند انتشار شعله مخلوط متان- هوا در یک محفظه بسته با حضور صفحات سوراخ دار با قطر مختلف؛ (الف) ۵ میلی متری، (ب) ۴ میلی متری



ادامه شکل ۵-۹: روند انتشار شعله مخلوط متان - هوا در یک محفظه بسته با حضور صفحات سوراخ دار با قطر مختلف؛
(ج) ۳ میلی متری، (د) ۲ میلی متری

در بازه زمانی ۴۵ تا ۵۵ میلی ثانیه موارد (الف تا ج)، شعله پس از عبور از صفحه سوراخ دار شتاب می‌گیرد. این ممکن است عمدتاً به این دلیل باشد که گازهای عبوری از صفحه گرم‌تر می‌باشند بنابراین سرعت سوختن شعله‌های فرار در نزدیکی صفحه افزایش می‌یابد، به طوری که شعله به انتشار خود ادامه می‌دهد و پس از آن مخلوط نسوخته باقی مانده در ناحیه بین مانع و محفظه مصرف می‌شود.

طبق نظریه بچکوف^۱ [۹۷]، در یک محفظه بسته، ناپایداری کلوین-هلمهولتز نقش مهمی در افزایش طول جبهه شعله و سرعت شعله دارد. این ناپایداری زمانی رخ می‌دهد که شعله در حال انتشار به مانع برخورد کند و شعله به دلیل برخورد با مانع تحت تنش برشی قرار می‌گیرد. بنابراین، اختلال جریان در داخل محفظه بسته توسط صفحات سوراخ دار نقش کلیدی در الگوی رشد جبهه شعله و سرعت نوک شعله دارد. در واقع انسداد ایجاد شده در مسیر جریان از دو جهت حائز اهمیت است: اول اینکه سرعت سوختن و شتاب شعله را افزایش می‌دهد و دوم اینکه انسداد باعث افزایش آشفستگی جریان می‌شود.

مطابق شکل (۵-۹) مورد (د)، زمانی که قطر صفحات سوراخ شده ۲ میلی‌متر باشد، شعله پس از برخورد به اولین صفحه سوراخ شده خاموش می‌شود و از صفحه عبور نمی‌کند (مورد (د) شکل ۵-۹ زمان ۳۵ میلی ثانیه). بنابراین با کاهش اندازه قطر منافذ صفحات سوراخ دار، شعله از صفحات سوراخ شده عبور نمی‌کند و خاموش می‌شود. همچنین به دلیل تغییر ضریب شکست نور شعله به لنز دوربین، لکه‌های سفید رنگ در شکل دیده می‌شود (مورد (د) شکل ۵-۹).

بنابراین با افزایش قطر منافذ صفحات سوراخ دار، شعله از صفحات سوراخ شده عبور می‌کند و پس از برخورد به مانع تبدیل به صورت شعله جت پخش می‌شود و در مدت زمان کوتاهی تبدیل به شعله آشفته می‌گردد. با استفاده از دو معیار، می‌توان تحلیل مختصری از خاموشی شعله ارائه داد:

¹- Bechkov

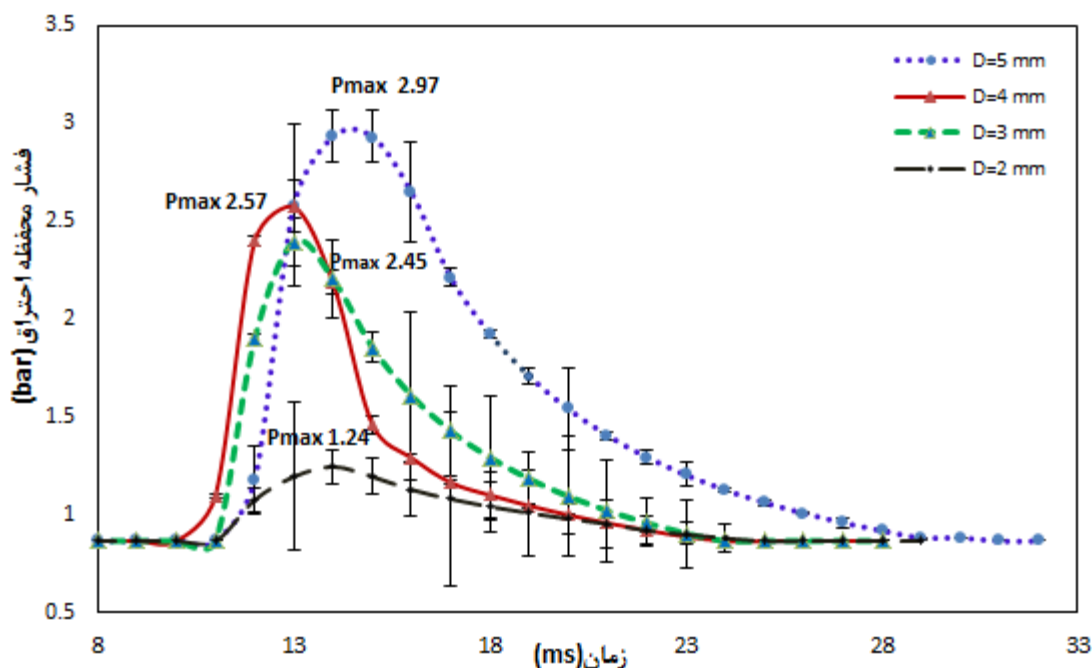
(۱) شعله با صرف انرژی کافی موجب گرم شدن صفحه سوراخ دار می شود.

(۲) سرعت آزاد شدن حرارت توسط واکنش های شیمیایی در داخل محفظه احتراق به دلیل وجود صفحه سوراخ دار با تعداد حفرات بیش تر کاهش یافته و باعث اتلاف حرارت و خاموش شدن شعله می شود. بنابراین طبق جدول (۴-۱)، افزایش تعداد حفرات، انرژی حرارتی داخل محفظه احتراق را کاهش داده و شعله را خاموش می کند. لذا مکانیسم اصلی خاموشی شعله در یک محیط متخلخل مکانیسم حرارتی است. هنگامی که شعله به یک مانع برخورد می کند از دست دادن حرارت از ناحیه واکنش به مانع می تواند به طور بالقوه منجر به خاموش شدن شعله شود.

این نتایج تأیید می کند که محیط متخلخل با چگالی منافذ بیشتر، مربوط به اندازه منافذ کوچکتر، به دلیل داشتن مساحت سطح داخلی مؤثر بزرگتر برای انتقال حرارت همرفتی بین محیط متخلخل و شعله، عملکرد بهتری در خاموش کردن شعله دارند.

شکل (۱۰-۵) تغییرات فشار محفظه احتراق را برای صفحات سوراخ دار با قطرهای مختلف نشان می دهد. طبق نتایج این نمودار، فشار داخل محفظه احتراق در نسبت هم ارزی ثابت، با حضور صفحات سوراخ دار با قطرهای مختلف متفاوت است.

در این حالت حداکثر خطای متوسط داده ها با توجه به عدم قطعیت سنسور فشار مورد استفاده حدود ۵/۶ درصد گزارش شده است.



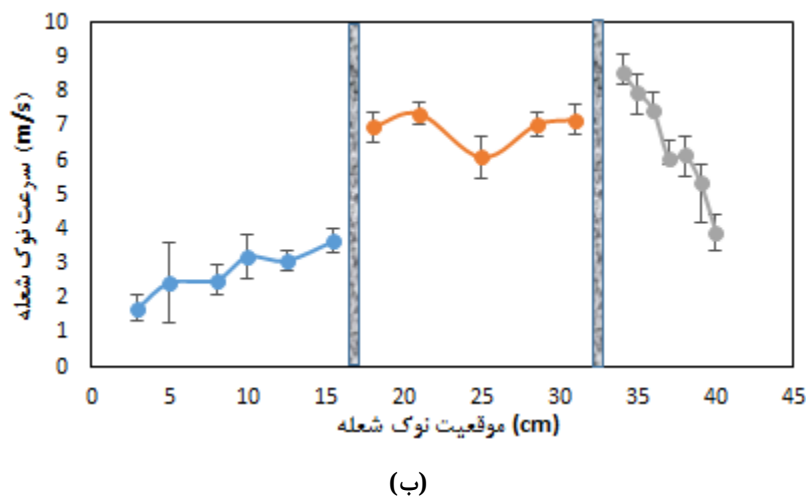
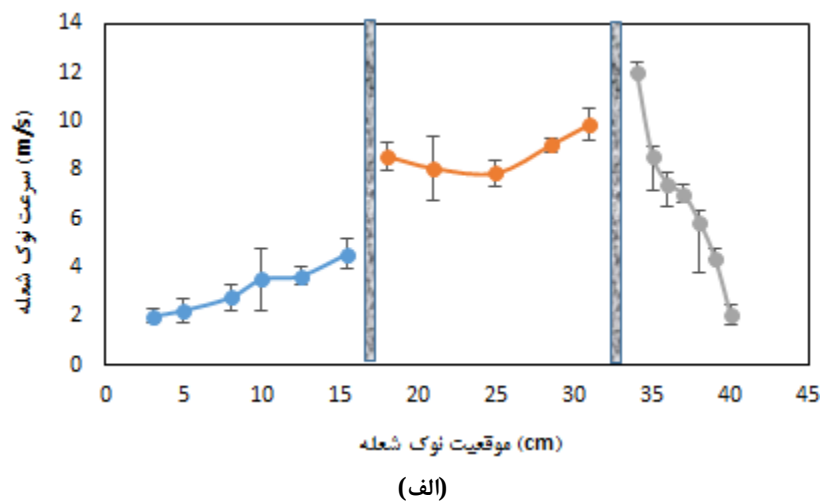
شکل ۵-۱۰: نمودار تغییرات فشار داخل محفظه احتراق بر حسب زمان با حضور صفحات سوراخ دار با قطرهای مختلف

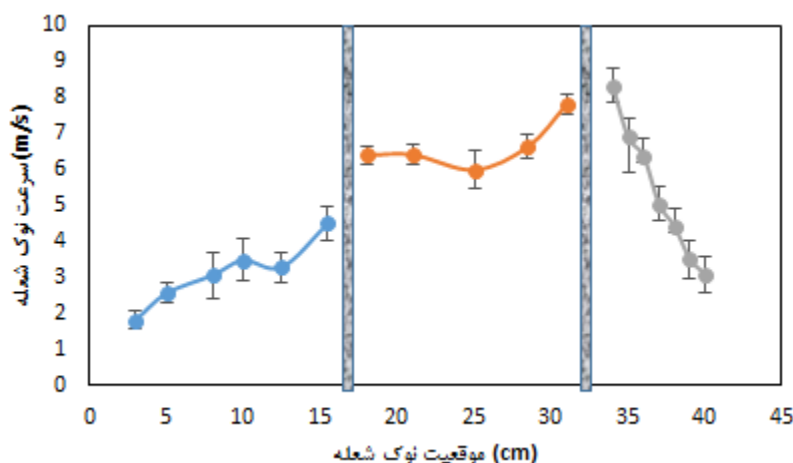
هنگامی که شعله با اولین صفحه سوراخ دار برخورد می‌کند، جبهه شعله متلاطم تر و موج دارتر به نظر می‌رسد و سطح شعله به سرعت افزایش می‌یابد و در نتیجه سرعت واکنش افزایش می‌یابد. طبق نتایج شکل (۵-۱۰) با شروع احتراق و زدن جرقه فشار به تدریج افزایش می‌یابد. در مراحل بعدی، شعله به تدریج توسط جریان آشفته ناشی از موانع چروک می‌شود و سطح شعله افزایش می‌یابد، که منجر به افزایش شیب نمودار فشار می‌شود. این افزایش فشار با یک شیب کوچک در فشار تا زمانی که جبهه شعله به صفحه سوراخ دار نزدیک می‌شود، ادامه می‌یابد. به دنبال آن، گازهای نسوخته به دام افتاده در پایین دست و بالادست موانع به سرعت سوزانده می‌شوند که منجر به افزایش سریع فشار بیش از حد می‌شود.

در قطر ۲ میلی‌متر فشار داخل محفظه نسبتاً کم است و حدود ۱/۲۴ بار گزارش شده است. با افزایش قطر صفحات سوراخ دار به ۳ میلی‌متر، حداکثر فشار داخل محفظه تا ۲/۴۵ بار افزایش می‌یابد. در نهایت، زمانی که قطر صفحات سوراخ شده به ۵ میلی‌متر افزایش می‌یابد، به دلیل قوی تر و شدیدتر بودن موج ضربه ای نسبت به زمانی که قطر صفحات سوراخ شده کمتر از ۵ میلی‌متر است، حداکثر فشار داخل محفظه احتراق به ۲/۹۷ افزایش

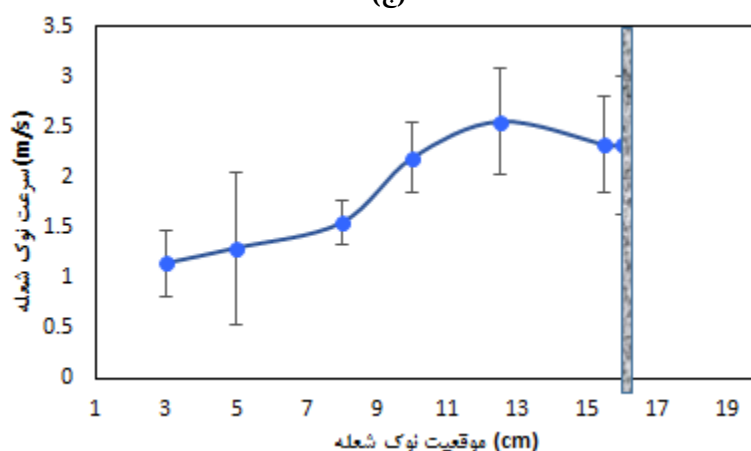
یافته است. همانطور که از شکل (۵-۱۰) مشاهده می‌شود، با افزایش اندازه قطر حفرات، تعداد منافذ کاهش و فشار ناشی از احتراق افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده از این نمودار با نتایج مطالعه لی و همکاران [۷۶] همخوانی خوبی دارد.

شکل (۵-۱۱) تغییرات سرعت نوک شعله را با حضور صفحات سوراخ دار با قطر مختلف نشان می‌دهد.





(ج)



(د)

شکل ۵-۱: نمودار تغییرات سرعت نوک شعله با حضور صفحات سوراخ دار با قطرهای مختلف، الف) ۵ میلی‌متر، ب) ۴ میلی‌متر، ج) ۳ میلی‌متر، د) ۲ میلی‌متر

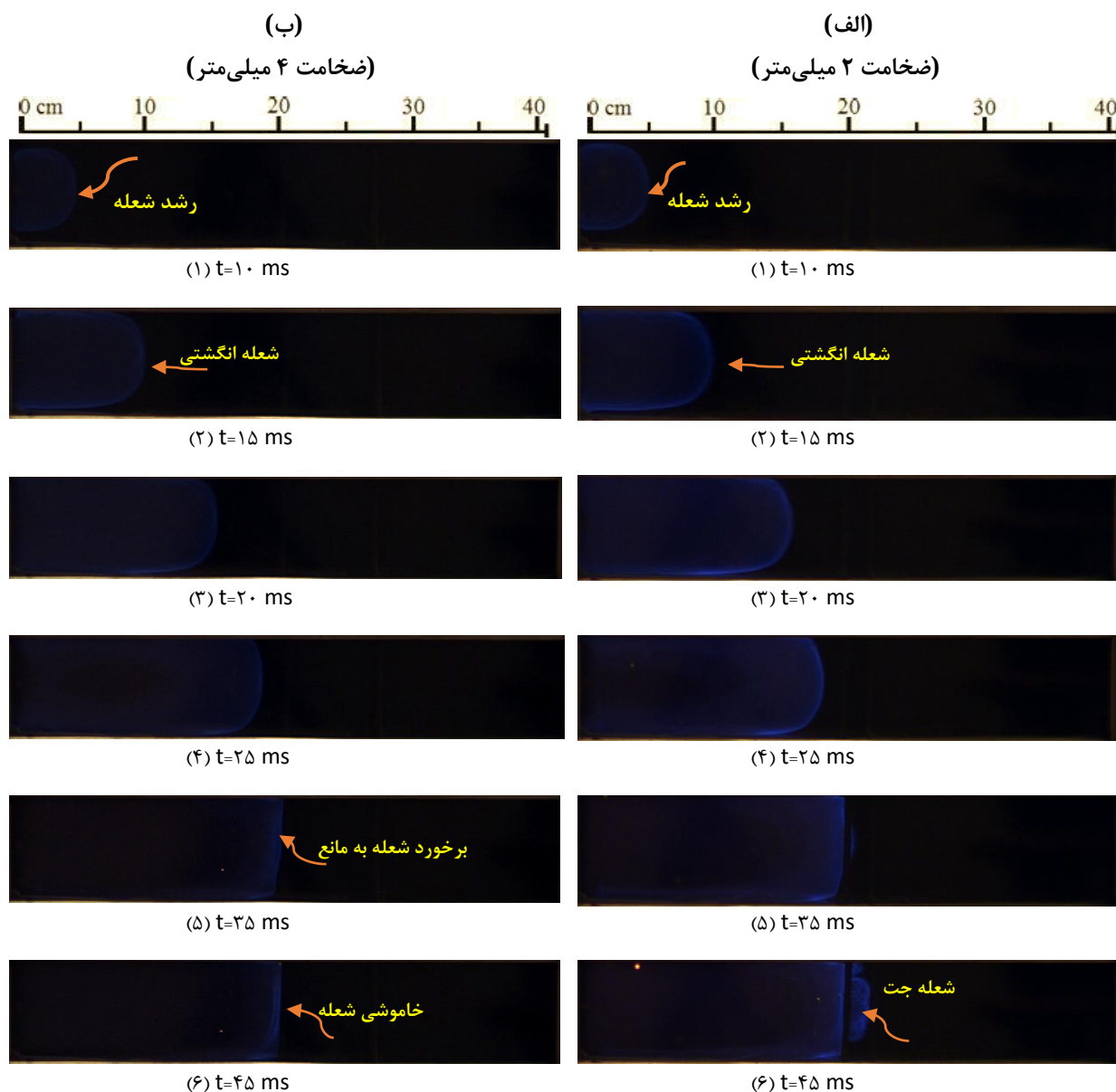
همانطور که در شکل (۵-۱۱) نشان داده شده است، سرعت "شعله آرام" قبل از عبور از صفحه سوراخ شده به تدریج افزایش می‌یابد. پس از عبور شعله از صفحه سوراخ دار، یک "شعله جت" سریع با سرعت متوسط ۸/۵ متر بر ثانیه ایجاد می‌شود (مورد الف)، سرعت شعله جت پس از عبور از اولین صفحه سوراخ شده کاهش می‌یابد. سپس شعله پس از برخورد به مانع دوم شتاب می‌گیرد و با گسترش احتراق و رشد شعله‌های جت به شعله‌ای متلاطم تبدیل می‌شود. سرعت متوسط جبهه شعله پس از عبور از صفحه سوراخ شده دوم از ۸/۵ متر بر ثانیه تا ۱۲ متر بر ثانیه متغیر است.

در شکل (۵-۱۱) مورد (د)، شعله پس از برخورد به صفحه سوراخ دار با منافذ ۲ میلی متری خاموش می شود. علت خاموش شدن شعله در این حالت، کاهش اندازه قطر حفره های صفحات سوراخ دار و افزایش تعداد حفرات است که باعث افزایش تلفات حرارتی در ناحیه نوک شعله شده و در نهایت شعله خاموش می شود.

با توجه به نتایج شکل (۵-۱۱)، با کاهش اندازه قطر منافذ صفحات سوراخ دار، سرعت نوک شعله پس از برخورد به صفحات سوراخ شده کاهش می یابد. بنابراین، صفحه سوراخ دار با اندازه منافذ ۵ میلی متری دارای بالاترین سرعت نوک شعله ۱۲ متر بر ثانیه است. در همین حال، مطابق شکل، سرعت نوک شعله در فشار اولیه ۰/۹۶۴ بار و اندازه منافذ ۲ میلی متر تنها ۲/۵ متر بر ثانیه است. با ارجاع به نتایج شکل (۵-۹)، انتشار شعله از منافذ بزرگتر منجر به تشکیل یک گرداب آشفته بزرگ می شود. ساختارهای گردابی پشت صفحه سوراخ دار نیز قابل مشاهده است. در این حالت انتشار شعله مخلوط بسیار آشفته تری ایجاد می کند که سرعت احتراق و شتاب شعله را افزایش می دهد.

۵-۴-۳- بررسی تأثیر ضخامت موانع بر رفتار شعله

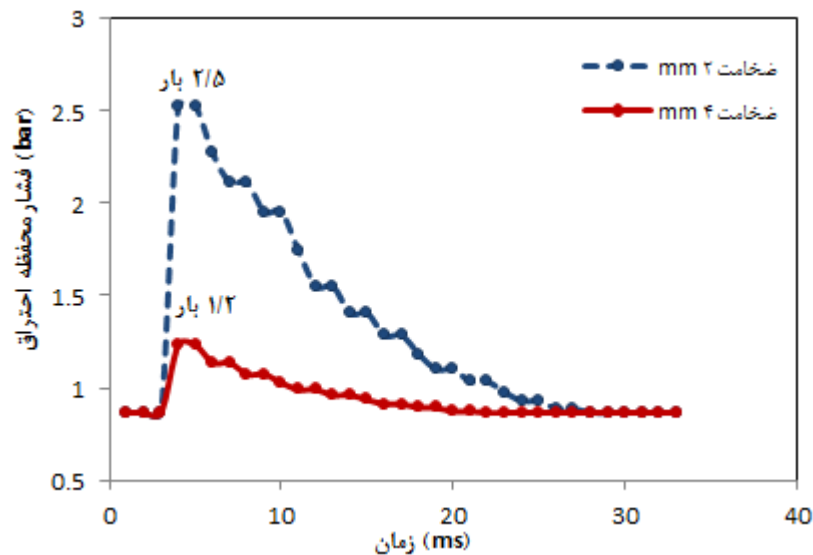
برای بررسی تأثیر ضخامت موانع بر رفتار شعله در محفظه بسته، در فاصله معینی از سیستم جرقه (۲۵ سانتی متری) از صفحه سوراخ دار با اندازه منافذ ۳ میلی متری با ضخامت ۲ و ۴ میلی متر استفاده گردید. شکل (۵-۱۲) روند انتشار شعله با حضور صفحه سوراخ دار با اندازه منافذ ۳ میلی متری را نشان می دهد. طبق نتایج حاصل از شکل، موانع ضخیم تر، عملکرد بهتری در خاموش کردن شعله نسبت به موانع نازک تر دارند. این به این دلیل است که انتقال حرارت به صفحات ضخیم تر بیشتر است و در نهایت باعث خاموشی شعله می شود. بنابراین علاوه بر قطر صفحات سوراخ دار، ضخامت موانع نیز عامل موثر در خاموشی شعله می باشد.



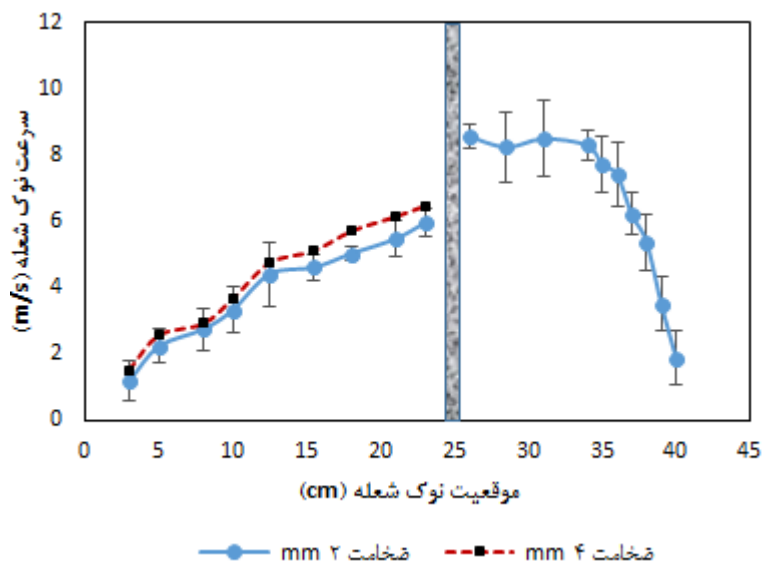
شکل ۵-۱۲: روند انتشار شعله مخلوط متان- هوا در یک محفظه بسته با حضور صفحه سوراخ دار ۳ میلی‌متری با ضخامت مختلف؛ (الف) ۲ میلی‌متری، (ب) ۴ میلی‌متری

شکل (۵-۱۳) و شکل (۵-۱۴) به ترتیب تغییرات فشار محفظه احتراق را نسبت به زمان با حضور صفحه سوراخ دار با ضخامت مختلف را نشان می‌دهد. همان طور که از نتایج این نمودار قابل مشاهده است، هنگامی که از صفحه سوراخ دار با ضخامت کمتر استفاده شده است فشار محفظه احتراق $2/5$ بار است و حداکثر سرعت شعله

به $8/3$ متر بر ثانیه رسیده است. در حالی که با حضور صفحه سوراخ دار با ضخامت 4 میلی متر، فشار محفظه احتراق به $1/2$ بار کاهش یافته و شعله در این حالت خاموش شده است.



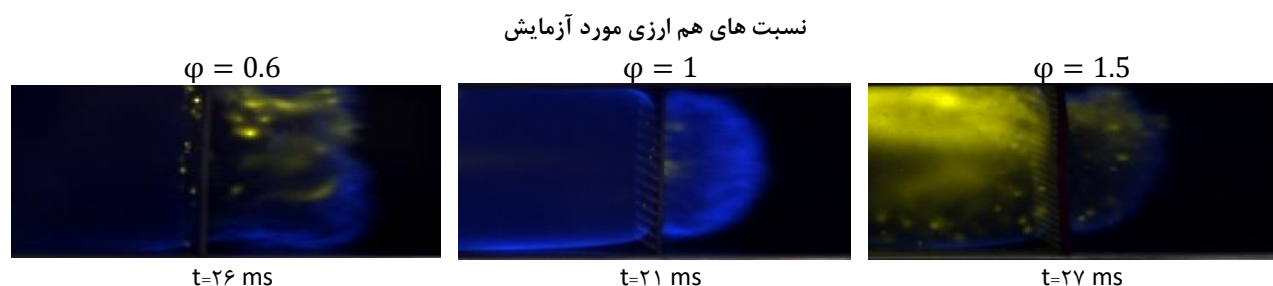
شکل ۵-۱۳: نمودار تغییرات فشار با حضور صفحه سوراخ دار 3 میلی متری با ضخامت مختلف 2 و 4 میلی متری



شکل ۵-۱۴: نمودار تغییرات سرعت با حضور صفحه سوراخ دار 3 میلی متری با ضخامت مختلف 2 و 4 میلی متری

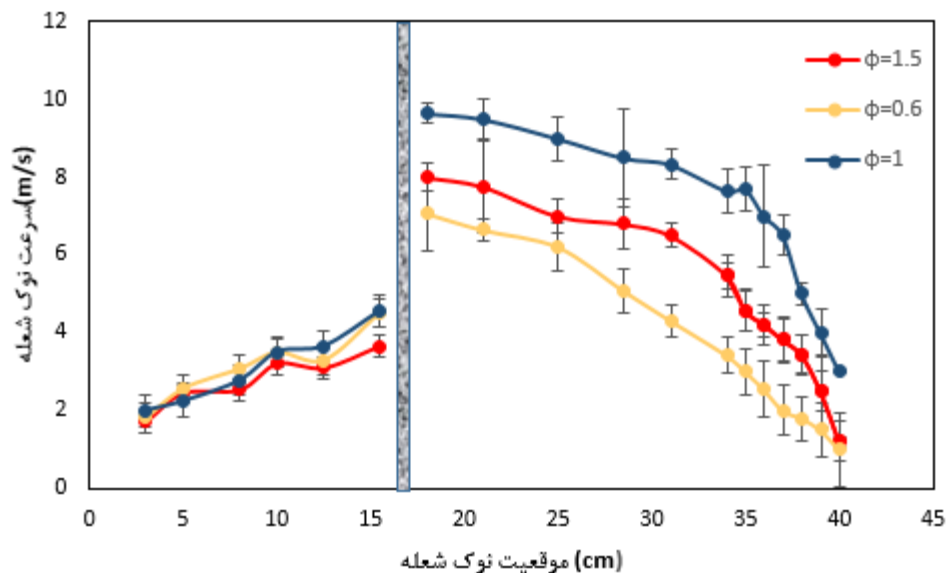
۵-۴-۴- بررسی تغییر نسبت هم ارزی بر رفتار شعله

برای بررسی اثر تغییر نسبت هم ارزی بر رفتار شعله، در فاصله معینی از سیستم جرقه، سه نسبت هم ارزی (0.6 ، 1 و 1.5) مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۵-۱۵) لحظه تبدیل شعله آرام به شعله جت را در این سه حالت نمایش می‌دهد. همان طور که از نتایج شکل پیداست، در نسبت هم ارزی یک نسبت به سایر نسبت‌های هم ارزی مورد آزمایش، شدت انتشار شعله جت هنگام عبور از صفحه سوراخ دار با قطر ثابت 4 میلی‌متر، بیش‌تر است و نسبت به سایر موارد در مدت زمان کمتری (21 میلی ثانیه) شعله جت ایجاد شده است.



شکل ۵-۱۵: روند انتشار شعله مخلوط متان- هوا در یک محفظه بسته با حضور صفحه سوراخ دار 4 میلی‌متری در نسبت هم ارزی مختلف

شکل (۵-۱۶) تغییرات سرعت نوک شعله را در نسبت‌های ارزی مختلف نشان می‌دهد. طبق نتایج به دست آمده، سرعت نوک شعله تا قبل از برخورد به مانع با تغییر نسبت هم ارزی تغییرات جزئی داشته است. این سرعت، برخورد سرعت شعله آرام و سرعت جریان گاز نسوخته می‌باشد. پس از عبور شعله از مانع، اثر تغییر نسبت هم ارزی بر سرعت نوک شعله مشهود است. در نسبت هم ارزی یک، حداکثر سرعت نوک شعله پس از عبور از مانع، $9/65$ متر بر ثانیه گزارش شده است. در حالی که این سرعت در نسبت‌های هم ارزی 0.6 و 1.5 کاهش یافته و به 7 متر بر ثانیه رسیده است. بنابراین در نسبت‌های هم ارزی بیشتر و کمتر از یک، سرعت نوک شعله کاهش یافته است. نتایج به دست آمده از این نمودار با نتایج مطالعه لی و همکاران [۷۶] همخوانی خوبی دارد.



شکل ۵-۱۶: نمودار تغییرات سرعت با حضور صفحه سوراخ دار ۴ میلی‌متری در فاصله ۱۶/۶ سانتی‌متری از سیستم جرقه در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف

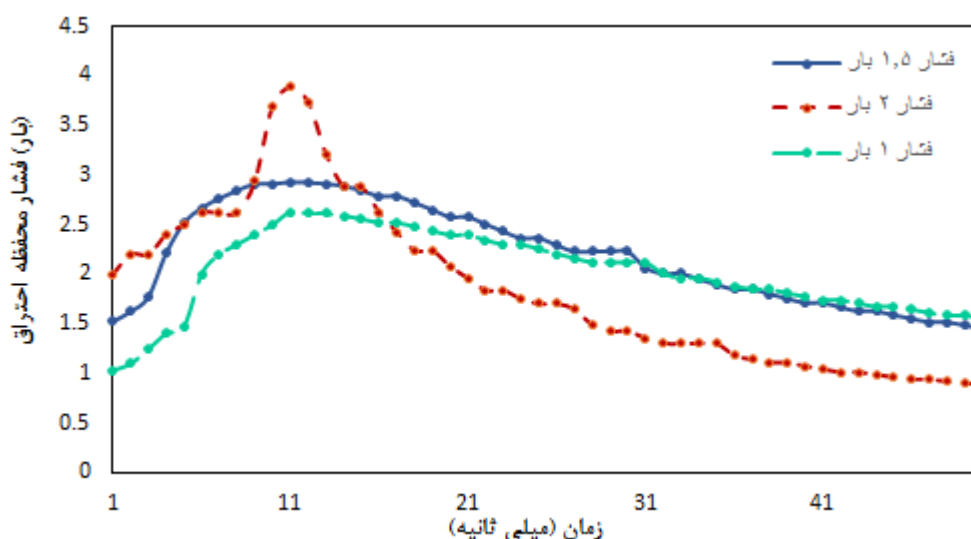
۵-۴-۵- بررسی تأثیر تغییر فشار اولیه مخلوط

برای بررسی تأثیر فشار اولیه مخلوط بر احتراق پیش مخلوط گاز متان و هوا، احتراق با حضور یک مانع ۳ میلی‌متری در فاصله مشخصی از سیستم احتراق (۱۶/۶ سانتی‌متری از شمع جرقه زن) تحت فشارهای مختلف ۱ بار، ۱/۵ بار و ۲ بار انجام شد. نتایج حاصل از آزمون احتراق انجام شده در جدول ۵-۲ آورده شده است.

جدول ۵-۲: نتایج اثر فشار اولیه مخلوط بر احتراق مخلوط گاز متان و هوا

اثر تغییر فشار اولیه مخلوط						
ردیف	تعداد مانع	قطر منافذ مانع (mm)	فشار اولیه مخلوط (bar)	فاصله از منبع احتراق (cm)	P_{max} (bar)	حداکثر سرعت نوک شعله (m/s)
۱	۱	۳	۱	۱۶/۶	۲/۵	۸/۵
۲	۱	۳	۱/۵	۱۶/۶	۳	۱۰/۱۳۵
۳	۱	۳	۲	۱۶/۶	۳/۹	۱۵/۵۴

روند افزایش فشار از آغاز جرقه برای سه فشار مختلف در شکل (۵-۱۷) نشان داده شده است. طبق نتایج به دست آمده، افزایش فشار اولیه مخلوط، با افزایش پارامترهای احتراقی مخلوط گاز متان و هوا همراه است. در نمودار شکل (۵-۱۷)، روند افزایش فشار در فشار ۲ بار بیش تر از سایر فشارهای اولیه بوده است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها تطابق خوبی با نتایج تحقیقات لیو و همکاران [۷۹] همخوانی دارد.

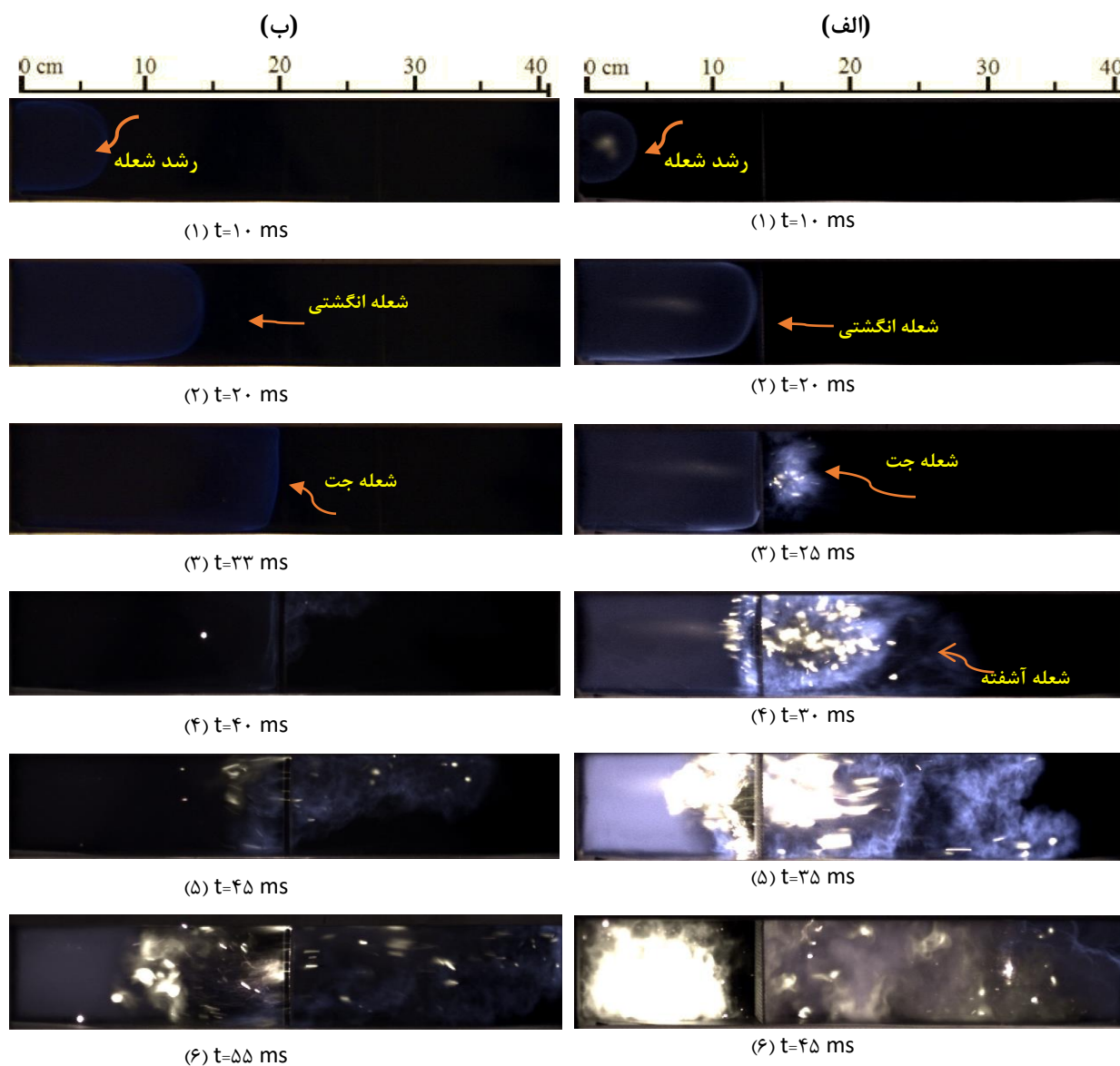


شکل ۵-۱۷: روند تغییر فشار با تغییر فشار اولیه مخلوط (۱ بار، ۱/۵ بار، ۲ بار)

۵-۴-۶- بررسی تأثیر موقعیت قرارگیری موانع از سیستم جرقه بر رفتار شعله

برای بررسی تأثیر موقعیت قرارگیری موانع از منبع جرقه، صفحه سوراخ دار ۴ میلی‌متری در سه موقعیت مختلف طبق شکل (۵-۴) قرار گرفت. در موقعیت (۱)، محفظه به سه قسمت مساوی تقسیم شده و مانع در قسمت اول یعنی در فاصله ۱۶/۶ سانتی‌متری از یکدیگر قرار دارند. در موقعیت (۲)، مانع در میانه محفظه یعنی در فاصله ۲۵ سانتی‌متری از جرقه قرار دارد و در موقعیت (۳)، مانع در فاصله ۳۳/۳ سانتی‌متری از جرقه قرار گرفته است. شکل (۵-۱۸) روند انتشار شعله را در این سه موقعیت نمایش می‌دهد. طبق نتایج مشاهده شده در این شکل، هنگامی که مانع در موقعیت (الف) در نزدیکی شمع جرقه زن قرار دارد، در مدت زمان ۳ تا ۵ میلی ثانیه شعله تشکیل شده و شروع به رشد می‌کند و در زمان ۱۰ تا ۲۰ میلی ثانیه به شکل انگشتی در طول محفظه انتشار می‌یابد. پس از شکل گیری شعله انگشتی، در زمان ۲۲ میلی ثانیه، شعله به مانع برخورد کرده و در زمان ۲۵ میلی

ثانیه تبدیل به شعله جت می‌شود. سپس به دلیل شتاب شعله پس از عبور شعله از صفحه سوراخ شده، احتراق سریع رخ می‌دهد و در مدت زمان کوتاهی شعله متلاطم گردیده و تبدیل به شعله آشفته شده است. در نتیجه، منطقه احتراق به دو قسمت تقسیم می‌شود. در همین حال، انبساط سریع محصولات احتراق به ناحیه سمت چپ صفحه سوراخ دار منتشر می‌شود. علاوه بر این، در این مرحله انتشار شعله در فاصله زمانی ۳۰ تا ۳۵ میلی ثانیه، جبهه شعله تقریباً معلق است و وارونه شدن جبهه شعله ناشی از برخورد موج با شعله مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۱۸: روند انتشار شعله مخلوط متان- هوا در یک محفظه بسته با حضور صفحه سوراخ دار ۴ میلی متری در فاصله؛
 (الف) ۱۶/۶ سانتی متری از سیستم جرقه، (ب) ۲۵ سانتی متری از سیستم جرقه



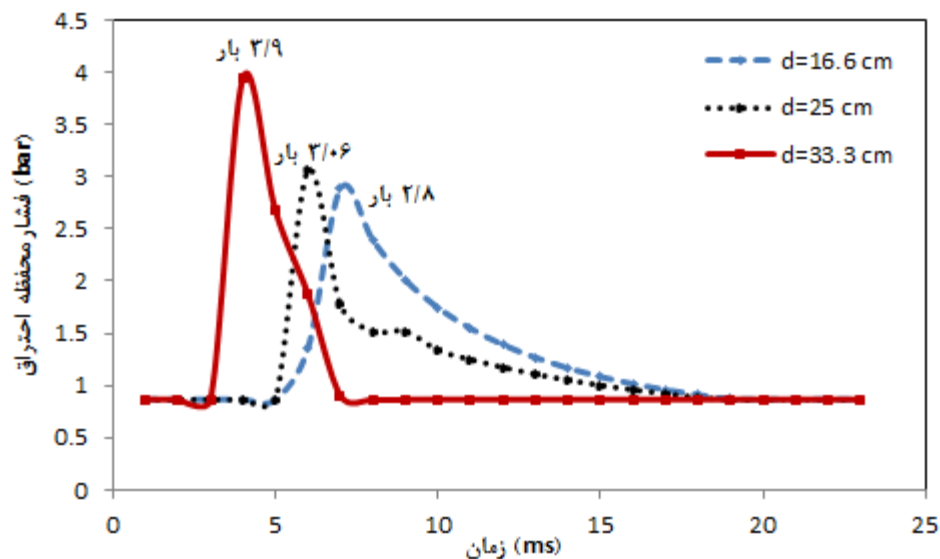
ادامه شکل ۵-۱۸: روند انتشار شعله مخلوط متان- هوا در یک محفظه بسته با حضور صفحه سوراخ دار ۴ میلی متری در فاصله ۳۳/۳ سانتی متری از سیستم جرقه

از طرفی هنگامی که مانع در موقعیت (ب) در فاصله ۲۵ سانتی متری از شمع جرقه زن قرار دارد، مشابه موقعیت (الف) در مدت زمان ۳ تا ۵ میلی ثانیه شعله تشکیل شده و شروع به رشد می کند و از زمان ۱۰ تا ۳۰ میلی ثانیه به شکل انگشتی در طول محفظه انتشار می یابد. در همین حال، شعله شتاب دهنده، گاز نسوخته جلوی شعله را به سمت صفحه سوراخ دار می راند سپس در مدت زمان ۳۳ میلی ثانیه، هنگام تشکیل شعله تخت، شعله به مانع برخورد کرده و تبدیل به شعله جت می گردد. در نتیجه، ساختار شعله بسیار پیچیده می شود و در نهایت

شعله آشفته در زمان ۴۰ میلی ثانیه تشکیل می‌شود. به دنبال انتشار شعله، یک موج ضربه‌ای پیشرو ایجاد می‌گردد، زیرا انتشار شعله، مخلوط نسوخته را فشرده می‌کند و متعاقباً یک سری امواج فشرده شده در جلوی شعله تشکیل می‌شود. در این حالت نسبت به موقعیت قبلی، فشار و شدت آشفته‌گی بیش‌تر است. به عبارتی دیگر با افزایش فاصله مانع از سیستم جرقه میزان آشفته‌گی افزایش می‌یابد.

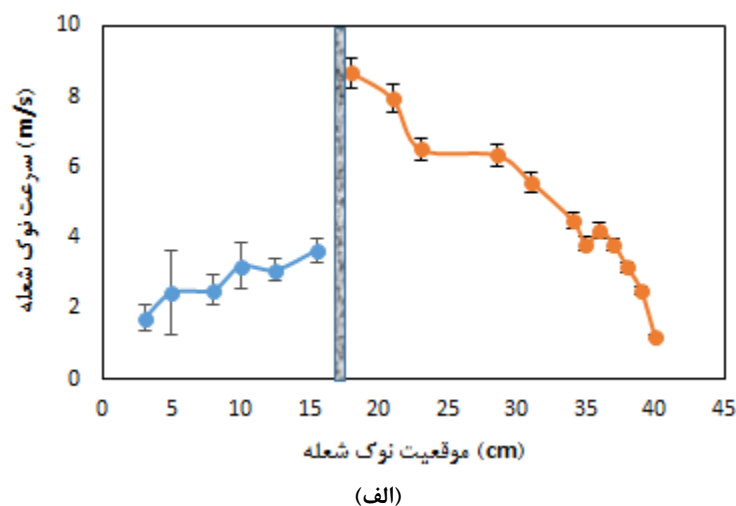
در موقعیت (ج) هنگامی که صفحه سوراخ دار در فاصله ۳۳/۳ سانتی‌متری از شمع جرقه زن قرار دارد، در این حالت، صفحه سوراخ دار بیش‌ترین فاصله را با شمع جرقه زن دارد. همانطور که انتظار می‌رود، انتشار شعله تا زمان ۴۵ میلی ثانیه مشابه حالت بدون صفحه سوراخ دار است. پس از تشکیل شعله لاله گون، در زمان ۵۰ میلی ثانیه شعله به مانع برخورد کرده و تبدیل به شعله جت و آشفته می‌گردد. در این حالت نسبت به موقعیت‌های دیگر میزان آشفته‌گی بیش‌تر است. زیرا برای فاصله بیش‌تر بین شمع جرقه زن و صفحه سوراخ دار، می‌توان ناحیه اغتشاش را برای مدت طولانی پیش گرم کرد و شرایط ترمودینامیکی را بهبود بخشید که می‌تواند به افزایش آشفته‌گی و سرعت نوک شعله کمک کند. لذا دو عامل مهم، شامل آشفته‌گی و گرم کردن مخلوط نسوخته با سرعت معین در ناحیه اغتشاش است که می‌تواند به انتشار شعله در طرف دیگر صفحه سوراخ دار کمک کند. بنابراین، شروع مناسب شکل‌گیری شعله آشفته یا مکان بهینه صفحه سوراخ شده در فضای محدود می‌تواند قوی‌ترین انتشار شعله و تماس بین شعله و شوک را ایجاد کند. نتایج به دست آمده از شکل (۱۸-۵) همخوانی خوبی با روند انتشار شعله در مطالعه لیو و همکاران [۷۹] دارد.

شکل (۱۹-۵) نمودار تغییرات فشار بر حسب زمان را برای هر سه موقعیت نمایش می‌دهد. طبق نتایج به دست آمده هنگامی که مانع در فاصله ۱۶/۶ سانتی‌متری از سیستم جرقه قرار گرفته است فشار حاصل از احتراق ۲/۸ بار می‌باشد، با افزایش فاصله مانع سوراخ دار از شمع جرقه زن تا ۳۳/۳ سانتی‌متر، فشار احتراق افزایش یافته و به ۳/۹ بار رسیده است. نتایج حاکی از آن است که فشار حاصل از احتراق علاوه بر قطر موانع به محل قرارگیری آن‌ها در محفظه بسته نیز بستگی دارد. بدین ترتیب با افزایش فاصله مانع از منبع احتراق، فشار حاصله افزایش می‌یابد.

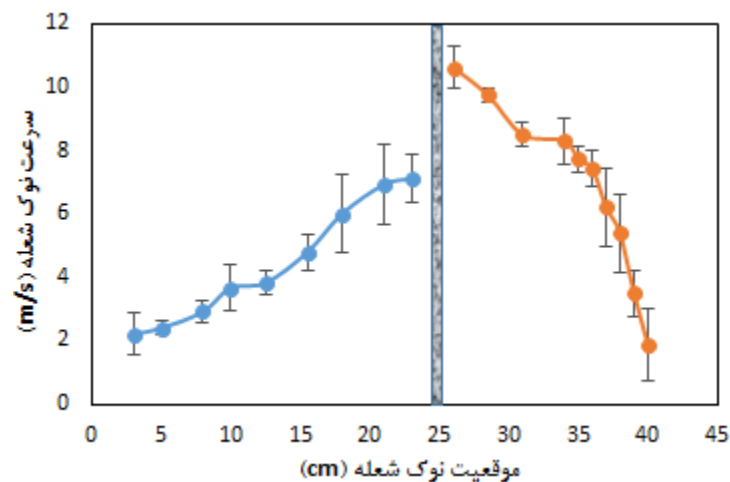


شکل ۵-۱۹: نمودار تغییرات فشار با حضور صفحه سوراخ دار ۴ میلی متری در سه فاصله مختلف از منبع احتراق

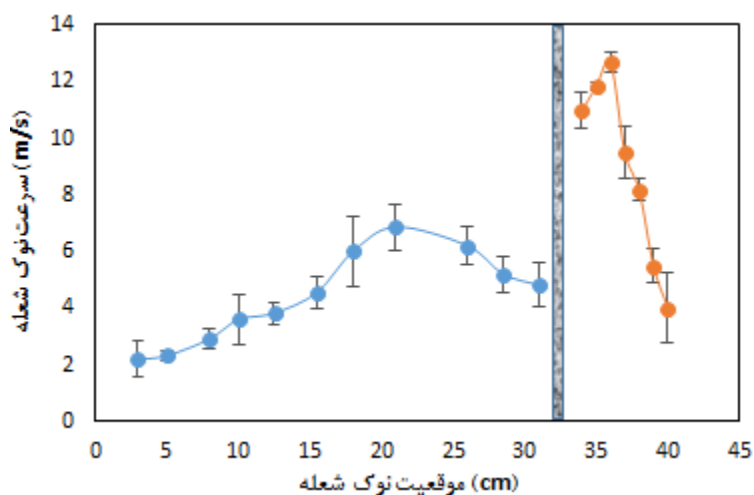
شکل (۵-۲۰) نمودار تغییرات سرعت نوک شعله را در سه موقعیت یاد شده نمایش می دهد. طبق نتایج مشاهده شده از نمودارهای الف تا ج شکل (۵-۲۰)، هنگامی که مانع در فاصله ۳۳/۳ سانتی متری از سیستم جرقه قرار دارد سرعت نوک شعله بعد از برخورد به مانع حدود ۱۲/۵ متر بر ثانیه می باشد. با کاهش فاصله مانع از شمع جرقه تا ۱۶/۶ سانتی متر، سرعت نوک شعله بعد از برخورد به مانع به ۸/۵ متر بر ثانیه رسیده است. به عبارت دیگر با افزایش فاصله مانع از منبع احتراق، سرعت نوک شعله نسبت به سایر موقعیت (۱) و (۲) افزایش یافته است. نتایج به دست آمده از این نمودارها همخوانی خوبی با نتایج لیو و همکاران [۷۹] دارد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵-۲۰: نمودار تغییرات سرعت با حضور صفحه سوراخ دار ۴ میلی‌متری در فاصله‌های مختلف از سیستم جرقه؛ الف) ۱۶/۶ سانتی‌متری، ب) ۲۵ سانتی‌متری، ج) ۳۳/۳ سانتی‌متری

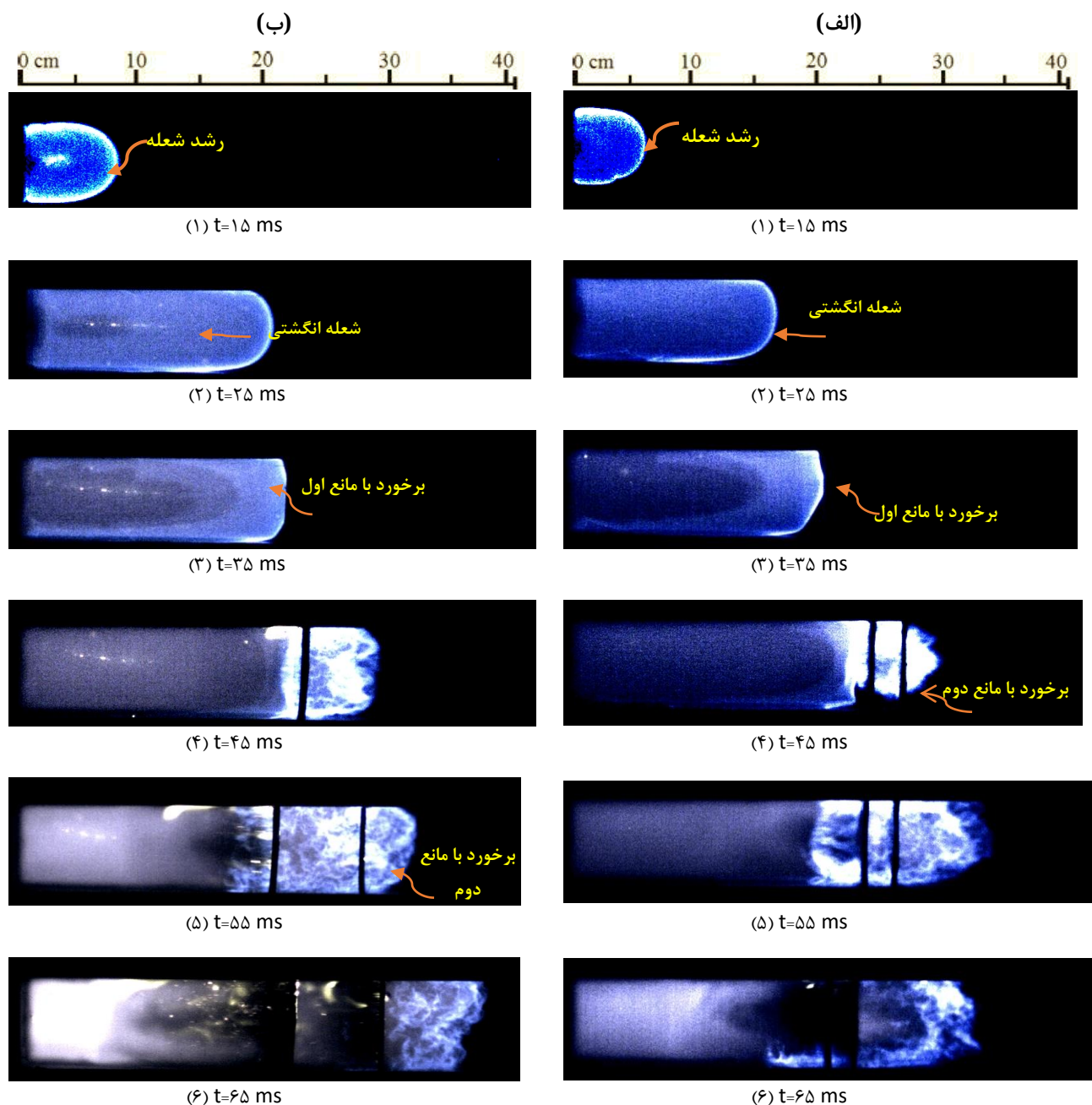
۵-۴-۷- بررسی اثر فاصله بین موانع بر رفتار شعله

هنگامی که در محفظه بسته از دو مانع استفاده می‌شود، فاصله بین موانع یکی از عوامل موثر بر پارامترهای احتراقی می‌باشد. به همین جهت برای بررسی فاصله بین موانع طبق جدول (۳-۵) حالت‌های زیر برای هر یک از موانع با قطرهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفت.

جدول ۳-۵: حالت‌های آزمایش شده جهت بررسی فاصله بین موانع

ردیف	موقعیت قرارگیری موانع		
	فاصله بین موانع (cm)	مانع دوم	مانع اول
۱	۲/۴	۱۹ سانتی‌متری از منبع احتراق	۱۶/۶ سانتی‌متری از منبع احتراق
	۱۶/۷	۳۳/۳ سانتی‌متری از منبع احتراق	
۲	۲/۵	۲۷/۵ سانتی‌متری از منبع احتراق	۲۵ سانتی‌متری از منبع احتراق
	۸/۳	۳۳/۳ سانتی‌متری از منبع احتراق	
۳	۲/۷	۳۶ سانتی‌متری از منبع احتراق	۳۳/۳ سانتی‌متری از منبع احتراق
	۸	۴۱/۶ سانتی‌متری از منبع احتراق	

شکل (۵-۲۱) روند انتشار شعله را زمانی که مانع اول ۴ میلی‌متری در موقعیت ۲۵ سانتی‌متری از سیستم جرقه و مانع دوم به ترتیب در فاصله ۲۷/۵ و ۳۳/۳ سانتی‌متری از سیستم جرقه قرار گرفته است را نشان می‌دهد. همانطور که از نتایج پیداست در هر دو حالت، در زمان ۳۶ میلی ثانیه شعله به مانع اول برخورد کرده و تبدیل به شعله جت می‌شود ولی در حالت اول در مدت زمان ۴۵ میلی ثانیه پس از تشکیل شعله جت، بلافاصله شعله به مانع دوم برخورد کرده در حالی که در این بازه زمانی در حالت دوم شعله جت به شعله آشفته تبدیل شده و در بازه زمانی ۵۰ میلی ثانیه به مانع دوم که در فاصله ۳۳/۳ سانتی‌متری از سیستم جرقه قرار دارد برخورد می‌کند. در واقع در حالت اول شعله بین دو مانع فرصت تبدیل به شعله آشفته را نداشته و بلافاصله به مانع دوم برخورد کرده است.

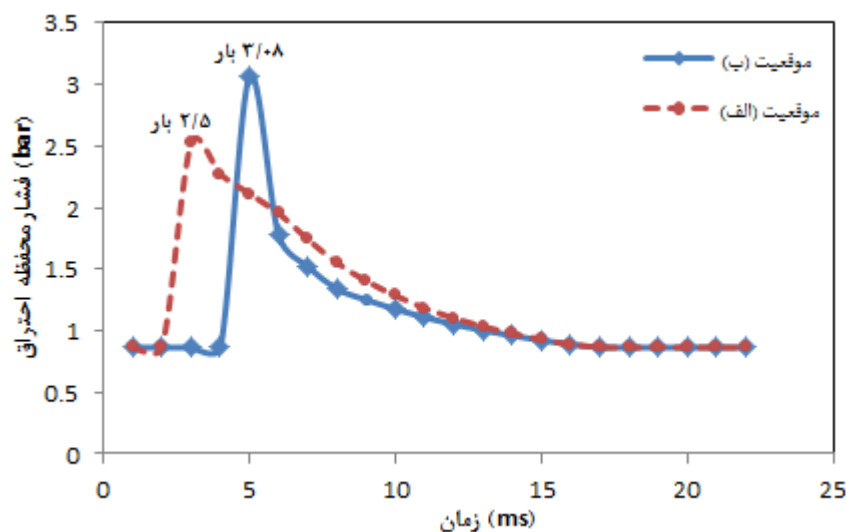


شکل ۵-۲۱: روند انتشار شعله مخلوط متان- هوا در یک محفظه بسته با حضور مانع اول در فاصله ۲۵ سانتی متری از سیستم جرقه، (الف) مانع دوم در فاصله ۲۷/۵ سانتی متری از سیستم جرقه (ب) مانع دوم در فاصله ۳۳/۳ سانتی متری از سیستم جرقه

شکل (۵-۲۲) نمودار تغییرات فشار محفظه احتراق را با تغییر فاصله بین دو صفحه سوراخ دار نشان می دهد.

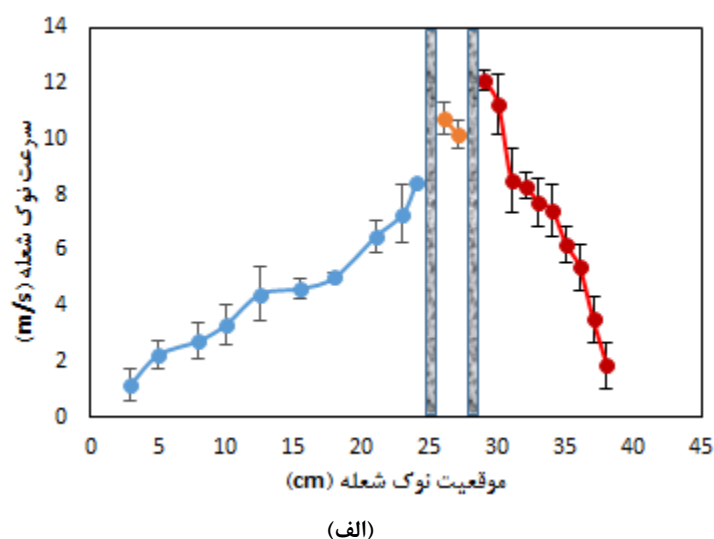
طبق نتایج حاصل از نمودار شکل (۵-۲۲)، هنگامی که فاصله بین صفحات ۲/۵ سانتی متر است، حداکثر فشار

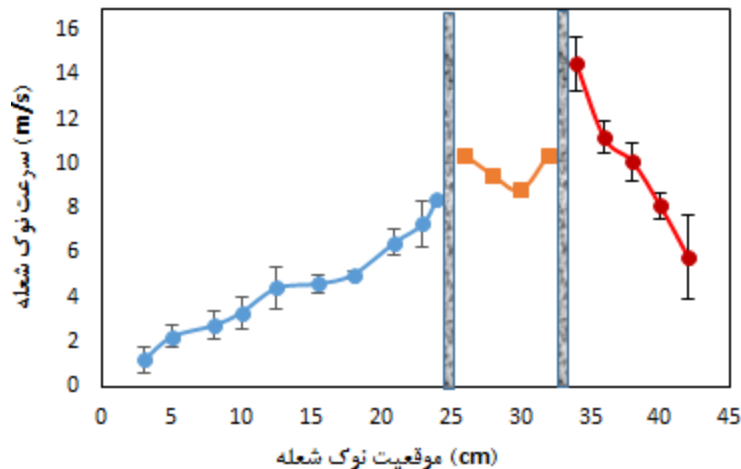
محفظه احتراق حدود ۲/۵ بار است، با افزایش فاصله بین صفحات سوراخ دار به ۸/۳ سانتی متر، حداکثر فشار محفظه احتراق افزایش یافته و به ۳/۰۸ بار می‌رسد.



شکل ۵-۲۲: نمودار تغییرات فشار با حضور صفحه سوراخ دار ۳ میلی متری در موقعیت (الف) فاصله بین صفحات ۲/۵ سانتی متر و موقعیت (ب) فاصله بین صفحات ۸/۳ سانتی متر

این افزایش فشار باعث افزایش چروک جبهه شعله شده و انتشار شعله را سریع تر می‌کند. این افزایش سطح شعله منجر به افزایش سرعت انتشار شعله و نرخ انتشار گرما می‌شود. نمودار تغییرات سرعت شعله با توجه به فاصله بین موانع در شکل (۲۳-۵) نشان داده شده است.





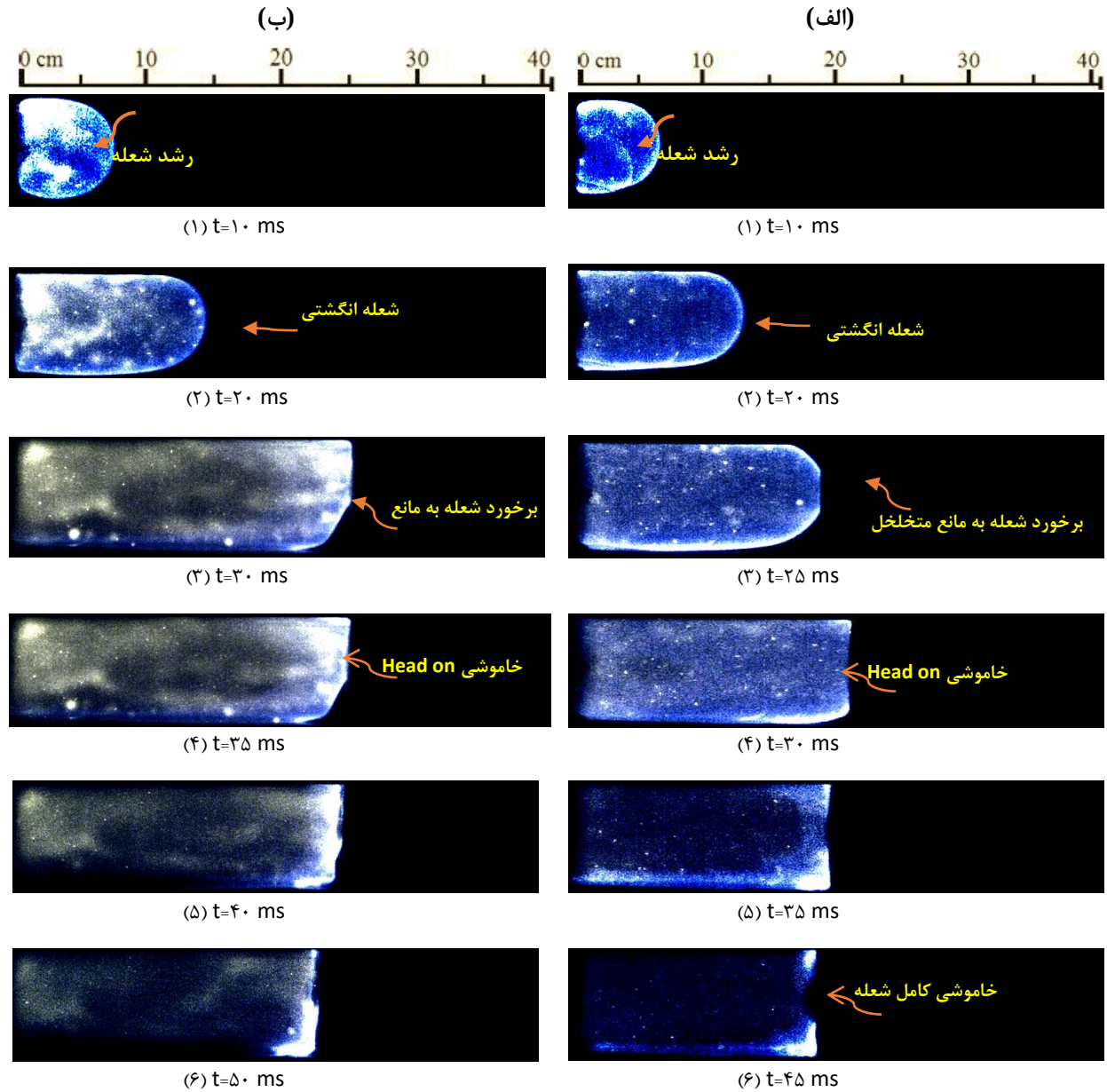
(ب)

شکل ۵-۲۳: نمودار تغییرات سرعت با حضور صفحه سوراخ دار ۴ میلی متری با تغییر فاصله بین موانع؛ الف) فاصله بین صفحات ۲/۵ سانتی متر، ب) فاصله بین صفحات ۸/۳ سانتی متر

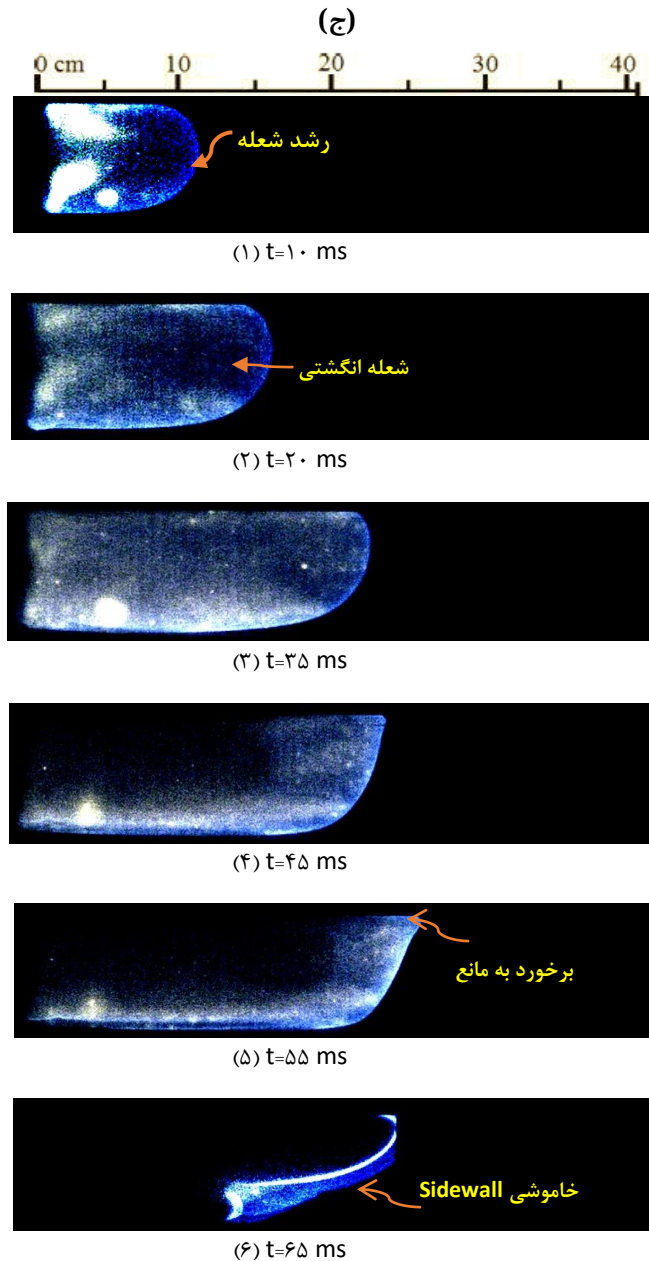
طبق نتایج حاصل از این شکل، با افزایش فاصله بین موانع از ۲/۵ تا ۸/۳ سانتی متر، حداکثر سرعت نوک شعله از ۱۲/۲۵ متر بر ثانیه به ۱۴ متر بر ثانیه افزایش یافته است. بنابراین با افزایش فاصله بین موانع، سرعت نوک شعله افزایش می یابد. نتایج حاصل از این تحقیق همخوانی خوبی با مطالعه آریف و همکاران [۸۱] دارد. در این مطالعه با افزایش فاصله بین موانع از ۱/۲ میلی متر به ۲/۴ میلی متر، سرعت نوک شعله از ۳۵ متر بر ثانیه به ۸۰ متر بر ثانیه رسیده است.

۵-۵- بررسی شباهت عملکرد موانع متخلخل با صفحات سوراخ دار

همانطور که در بخش های قبل توضیح داده شد، با برخورد شعله به صفحه سوراخ دار ۲ میلی متری خاموشی شعله اتفاق می افتد. به جهت بررسی عملکرد صفحات سوراخ دار و موانع متخلخل در خاموشی شعله، مانع متخلخلی با قطر منافذ ۲ میلی متر و از جنس آلومینیوم و تخلخل یکسان با صفحات سوراخ دار طراحی گردید. تفاوت این صفحات سوراخ دار و موانع متخلخل در تعداد روزنه ها و منافذ می باشد. شکل (۲۴-۵) روند انتشار شعله در اثر برخورد به مانع متخلخل ۲ میلی متری را در سه موقعیت مختلف از سیستم احتراق نشان می دهد.



شکل ۵-۲۴: روند انتشار شعله مخلوط متان- هوا با حضور مانع متخلخل ۲ میلی متری در یک محفظه بسته؛ الف) ۱۶/۶ سانتی متری از سیستم جرقه، ب) ۲۵ سانتی متری از سیستم جرقه



ادامه شکل ۵-۲۴: روند انتشار شعله مخلوط متان- هوا با حضور مانع متخلخل ۲ میلی متری در یک محفظه بسته؛ (ج) ۳۳/۳ سانتی متری از سیستم جرقه

طبق نتایج مشاهده شده از شکل (۲۴-۵)، شعله هنگام برخورد به مانع متخلخل اول در هر ۳ موقعیت خاموش شده است. علت خاموش شدن شعله پس از برخورد به مانع متخلخل ۲ میلی متری، تلفات حرارتی در ناحیه نوک شعله می باشد که باعث خاموشی شعله شده است.

همانطور که از نتایج این شکل پیداست، الگوی خاموشی موقعیت (الف و ب) با الگوی خاموشی موقعیت (ج) متفاوت است. هنگامی که مانع متخلخل ۲ میلی‌متری در فواصل ۱۶/۶ و ۲۵ سانتی‌متری از موقعیت جرقه قرار می‌گیرد (موقعیت الف)، الگوی خاموشی شعله به صورت Head-on (سر به سر) است (فریم ۴ تا ۶). هنگامی که مانع متخلخل ۲ میلی‌متری در فاصله ۳۳/۳ سانتی‌متری از سیستم جرقه قرار دارد، شعله به صورت Side wall (موازی با دیواره جانبی) خاموش می‌شود (فریم ۴ تا ۶). در این حالت چون ضخامت ناحیه پیش گرمایش بزرگ‌تر از شعله است، کاهش سرعت سوختن به دلیل کشش شعله آشکارتر می‌شود و باعث تفاوت سرعت انتشار لبه بالایی شعله و لبه پایینی شعله خواهد شد. به عبارت دیگر، با افزایش فاصله صفحه سوراخ شده از موقعیت جرقه، الگوی خاموشی شعله از "Head-on" به "Side wall" تغییر می‌کند. بنابراین یکی از عوامل مؤثر بر الگوی خاموشی شعله، فاصله مانع از سیستم جرقه می‌باشد. با افزایش فاصله موانع از سیستم جرقه، شعله در مدت زمان بیش‌تری در طول محفظه انتشار می‌یابد و پس از تشکیل شعله لاله‌گون به دلیل اختلاف سرعت ایجاد شده بر اثر کشش شعله، الگوی خاموشی ایجاد شده به صورت دیواره جانبی می‌باشد.

۵-۶- آنالیز ابعادی

امروزه به منظور بررسی یک پدیده فیزیکی در یک مقیاس بزرگ به وسیله انجام شبیه‌سازی این پدیده در یک مقیاس کوچک می‌توان نتایج به دست آمده را در سیستم اصلی بسط و توسعه داد. با طراحی یک مدل از یک سیستم واقعی و انجام آزمایشات توسط آن به منظور مطالعه قرار دادن رفتار سیستم، از روش شبیه‌سازی استفاده می‌شود. تحلیل ابعادی^۱ روشی برای کاهش تعداد و پیچیدگی متغیرهای آزمایشگاهی مؤثر بر یک پدیده فیزیکی با استفاده از تکنیک متراکم سازی است. از آنالیز ابعادی می‌توان جهت تعیین اصول طراحی مدل‌ها با استفاده از مفهوم تشابه و تعیین مقیاس لازم برای بررسی خواص سیال و ابعاد مختلف فیزیکی استفاده کرد [۹۸].

¹- Dimensional Analysis

در حالت کلی تمام روابط فیزیکی را می‌توان بر مبنای مقادیر اصلی نیرو (F)، طول (L) و زمان (T) و یا جرم (M) نمایش داد. جدول (۴-۵) ابعاد کمیت‌های مورد استفاده در این رساله را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۵: ابعاد کمیت‌های مورد استفاده در این رساله

ردیف	کمیت مورد استفاده	واحد	ابعاد
۱	فشار	Pa, N/M ²	ML ⁻¹ T ⁻²
۲	سرعت	m/s	LT ⁻¹
۳	شتاب	m/s ²	LT ⁻²
۴	قطر موانع	mm	L

طبق تئوری π باکینگهام^۱، هرگاه مسئله‌ای فیزیکی شامل n کمیت مؤثر بوده و r بعد اصلی برای نمایش آن وجود داشته باشد، کمیت‌ها را می‌توان با n-r گروه بی بعد مستقل نمایش داد [۹۹]. در این رساله برای خاموشی شعله طبق جدول ۴-۵ حدود ۴ کمیت وجود دارد و با توجه به ۳ بعد اصلی T، L و M، یک عدد بی بعد مورد بررسی قرار می‌گیرد. مهمترین گروه‌های بی‌بعدی که در این رساله می‌توان در نظر گرفت عبارتند از:

✓ عدد رینولدز^۲

✓ عدد اولر^۳

✓ عدد گراشوف^۴

^۱- Buckingham π theorem

^۲- Reynolds number

^۳- Euler number

^۴- Grashof number

(۱) عدد رینولدز:

این عدد نسبت نیروی اینرسی به نیروی لزجت یا همان اصطکاک است که طبق رابطه ۵-۲ قابل محاسبه است. عدد رینولدز بحرانی در رژیم‌های مختلف جریان نظیر جریان آشفته و لایه مرزی و یا اطراف اجسام شناور تمایز دارد [۹۹].

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (۵-۲)$$

(۲) عدد اولر:

طبق رابطه ۵-۳ عدد اولر نسبت نیروی فشار به نیروی اینرسی را نشان می‌دهد:

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho v^2} \quad (۵-۳)$$

در این رابطه ρv^2 ، فشار دینامیکی و ΔP فشار محلی منهای فشار جریان آزاد است.

(۳) عدد گراشوف^۱:

عدد گراشوف نسبت نیروی شناوری به ویسکوزیته یک سیال را نشان می‌دهد و طبق رابطه ۵-۴ قابل محاسبه است:

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu^2} \quad (۵-۴)$$

در این رابطه، g شتاب گرانش، β ثابت انبساط حجمی، ΔT اختلاف دمای گاز سوخته به نسوخته، L طول محفظه و ν ویسکوزیته سینماتیکی می‌باشد.

^۱ - Grashof

عدد گراشوف در جریان‌هایی با تأثیر سطوح مانند دیواره‌ها (نظیر جریان در یک محفظه) قابل ملاحظه می‌باشد. وقتی عدد گراشوف خیلی بزرگ‌تر از یک است، نیروهای ویسکوزیته در مقابل نیروهای شناوری و اینرسی قابل چشم پوشی است. وقتی نیروهای شناوری به ویسکوزیته غالب باشند، جریان به سمت آشفته‌گی حرکت می‌کند. لذا در اعداد گراشوف بالا، لایه مرزی آشفته و در اعداد گراشوف پایین، لایه مرزی آرام است.

به جهت ایجاد ارتباط بین یک جریان واقعی (نمونه اصلی^۱) و جریانی با مرزهای کوچک‌تر ولی از نظر هندسی مشابه با آن مدل با مقیاس کوچک‌تر از تشابه استفاده می‌شود. به تعبیر دیگر تشابه، تئوری و هنر پیش‌بینی عملکرد مدل نسبت به نمونه واقعی است. در این رساله از تشابه سینماتیکی جهت ایجاد ارتباط بین نمونه اصلی و مدل آزمایشگاهی استفاده شده است.

۵-۶-۱- تشابه سینماتیکی

تحلیل مسیر حرکت گاز و نسبت سرعت‌ها در مدل آزمایشگاهی و نمونه اصلی را می‌توان با استفاده از تشابه سینماتیکی بیان کرد. به عبارت دیگر، دو جریان زمانی تشابه سینماتیکی دارند که گاز مورد بررسی در زمان‌های متناظر در محل‌های متناظر قرار گیرند به عبارتی دارای موقعیت‌های یکسانی باشند. در این حالت تنها در صورت وجود نسبت سرعت خاصی بین مدل و نمونه اصلی تشابه سینماتیکی برقرار می‌شود. در این حالت تساوی عدد گراشوف در مدل و نمونه اصلی شرط تشابه سینماتیکی این جریانات طبق رابطه (۵-۵) تا (۵-۹) است.

$$(Gr)_m = (Gr)_p \quad (۵-۵)$$

$$\frac{\beta g_m \Delta T_m L^3}{g^2} = \frac{\beta g_p \Delta T_p L^3}{g^2} \quad (۶-۵)$$

$$g_m \Delta T_m = g_p \Delta T_p \quad (۷-۵)$$

بنابراین جهت برقراری تشابه سینماتیکی ضروری است که رابطه $g_m \Delta T_m = g_p \Delta T_p$ برقرار باشد.

^۱- Prototype

مقیاس گذاری گراشوف نشان می‌دهد که گروه بی بعد اصلی که در آزمایش‌های احتراق باید حفظ شود عدد گراشوف است که همان طور که بیان شد نشان دهنده نسبت نیروی شناوری به ویسکوزیته است. باید به این نکته مهم دقت کرد که انتشار شعله توسط نیروی شناوری هدایت می‌شود و دلیل اصلی استفاده از عدد گراشوف در این نوع مقیاس گذاری می‌باشد.

تساوی عدد گراشوف در مدل و نمونه اصلی در واقع ارتباط شتاب گرانشی و اختلاف دمای گاز سوخته و نسوخته در مدل و نمونه اصلی را در تمام مکان‌ها و زمان‌ها ثابت نگه می‌دارد. بنابراین جهت اطمینان از مقایسه صحیح هر نمونه اصلی مورد بررسی با مدل حاضر در این رساله، می‌بایست عدد گراشوف نمونه اصلی با عدد گراشوف محاسبه شده در محفظه احتراق این رساله که در ابتدای فصل پنجم به آن اشاره شده است یکسان باشد.

۵-۷- جمع بندی

در این فصل عوامل مؤثر بر احتراق مخلوط گاز متان و هوا با استفاده از یک محفظه بسته با حضور موانع متخلخل و صفحات سوراخ دار طراحی شده مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. در این فصل تأثیر تعداد موانع ضخامت موانع، اندازه منافذ موانع، نسبت هم ارزی، فاصله موانع از سیستم جرقه و فاصله موانع از یکدیگر بر انتشار شعله، فشار حاصل از احتراق و سرعت نوک شعله مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. هدف از بررسی پارامترهای مختلف، رسیدن به پدیده خاموشی شعله می باشد. پدیده خاموشی شعله به پارامترهای مختلفی از جمله قطر موانع، ضخامت موانع و فاصله بین موانع تا سیستم جرقه بستگی دارد. با تغییر فاصله از منبع جرقه، الگوی خاموشی شعله نیز تغییر می کند که در این فصل مورد بحث و تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری

موانع متخلخل و صفحات سوراخ دار، به صورت خاص به جهت جلوگیری از انتشار شعله مخلوط گاز متان و هوا و در نهایت رسیدن به خاموشی شعله استفاده می شود. خاموشی شعله با استفاده از موانع متخلخل و صفحات سوراخ دار به پارامترهای مختلفی از قبیل تعداد موانع، اندازه قطر منافذ موانع، نسبت هم ارزی، ضخامت موانع، فاصله بین موانع، فاصله موانع از سیستم جرقه و غیره بستگی دارد. در این تحقیق اثر موارد ذکر شده بر پارامترهای احتراقی مخلوط متان و هوا از قبیل روند انتشار شعله، فشار محفظه احتراق و سرعت نوک شعله بررسی شد و در نهایت عملکرد صفحات سوراخ دار و موانع متخلخل در خاموشی شعله مورد ارزیابی قرار گرفت. لذا بدین منظور از یک محفظه بسته مکعب مستطیلی برای انجام آزمایش ها و از یک دوربین سرعت بالا برای ثبت روند انتشار شعله و بررسی خاموشی شعله استفاده گردید. به طور کلی نتایج حاصل از انجام این تحقیق را می توان به صورت زیر عنوان کرد:

- یکی از عوامل مؤثر در بررسی اثر موانع بر احتراق مخلوط متان و هوا، تعداد موانع است. طبق بررسی های حاصل از این تحقیق، با افزایش تعداد موانع، فشار حاصل از انفجار کاهش و سرعت نوک شعله افزایش می یابد. به طوری که با تکرار مانع مشابه در طول محفظه احتراق، حداکثر سرعت نوک شعله از ۸/۵ متر بر ثانیه به ۱۲/۵ متر بر ثانیه رسیده است.

- برای بررسی اثر قطر منافذ موانع از ۴ صفحه سوراخ دار به قطر ۲، ۳، ۴ و ۵ میلی متر استفاده شد. نتایج حاصل از آزمایش حاکی از آن است که بین اندازه قطر منافذ موانع و شدت احتراق رابطه مستقیمی وجود دارد. به گونه ای که با افزایش قطر منافذ موانع سوراخ دار، فشار حاصل از احتراق و حداکثر سرعت نوک شعله افزایش می یابد. هنگامی که در طول محفظه بسته از مانع سوراخ دار ۵ میلی متری در فاصله معینی از سیستم احتراق (۱۶/۶ سانتی متری) استفاده شده است، فشار محفظه احتراق حدود ۳ بار و حداکثر سرعت نوک شعله در طول محفظه حدود ۱۲/۵ متر بر ثانیه می باشد. با کاهش قطر موانع به ۲ میلی متر، شعله پس از برخورد به مانع اول به

دلیل افزایش اتلاف حرارتی خاموش شده و فشار محفظه احتراق به $1/24$ بار و حداکثر سرعت نوک شعله به $2/5$ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد.

- علاوه بر قطر منافذ موانع، ضخامت موانع نیز در خاموشی شعله مؤثر است به گونه‌ای که با افزایش ضخامت موانع سوراخ دار با قطر 3 میلی‌متری از 2 به 4 میلی‌متر، شعله پس از برخورد به مانع خاموش شده است. در حالی که شعله با برخورد به همان مانع با ضخامت 2 میلی‌متر، از مانع عبور کرده است.

- یکی دیگر از پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق، اثر نسبت هم ارزی بر پارامترهای احتراقی می‌باشد. طبق نتایج حاصله، بیش‌ترین میزان فشار و سرعت شعله در نسبت هم ارزی 1 حاصل شده است.

- فاصله مانع از سیستم احتراق یکی از دیگر عوامل مؤثر در روند انتشار شعله و پارامترهای احتراقی می‌باشد. با افزایش فاصله مانع از سیستم جرقه، سرعت نوک شعله و فشار حاصل از احتراق افزایش می‌یابد. زیرا برای فاصله بیش‌تر بین شمع جرقه زن و صفحه سوراخ‌دار، می‌توان ناحیه اغتشاش را برای مدت طولانی پیش گرم کرد و شرایط ترمودینامیکی را بهبود بخشید که می‌تواند به افزایش آشفته‌گی و سرعت نوک شعله کمک کند. بدین ترتیب با افزایش فاصله مانع از $16/6$ سانتی‌متر به $33/3$ سانتی‌متر، حداکثر سرعت نوک شعله از $8/5$ به $12/5$ متر بر ثانیه و حداکثر فشار حاصل از احتراق از $2/8$ بار به $3/9$ بار افزایش یافته است.

- فاصله بین موانع نیز یکی از عوامل مؤثر بر سرعت شعله و فشار احتراق می‌باشد. با افزایش فاصله بین موانع، سرعت نوک شعله از $12/25$ به 14 متر بر ثانیه و فشار حاصل از احتراق از $2/5$ به $3/08$ بار افزایش یافته است.

- در این رساله، طی آزمایشات انجام شده دو الگوی خاموشی Head-on و Sidewall قابل مشاهده است. فاصله موانع از سیستم جرقه در تغییر این الگوهای خاموشی مؤثر است به گونه‌ای که با افزایش فاصله مانع از سیستم جرقه به دلیل افزایش اتلاف حرارتی، سرعت لبه بالایی شعله بیش‌تر از سرعت لبه پایینی شعله می‌باشد، لذا الگوی خاموشی از Head-on به Sidewall تبدیل می‌شود.

- به جهت بررسی شباهت عملکرد مانع متخلخل با مانع سوراخ دار، یک مانع متخلخل 2 میلی‌متری با جنس، ضخامت و تخلخل مشابه طراحی و ساخته شد. طبق نتایج آزمایش‌ها، مانع متخلخل 2 میلی‌متری همانند مانع

سوراخ دار ۲ میلی متری در موقعیت های مختلفی از سیستم جرقه باعث خاموشی شعله شده است. بنابراین محیط متخلخل با چگالی منافذ بیش تر به دلیل داشتن مساحت سطح داخلی موثر بزرگ تر برای انتقال حرارت همرفتی بین محیط متخلخل و شعله، عملکرد خوبی در خاموشی شعله دارند.

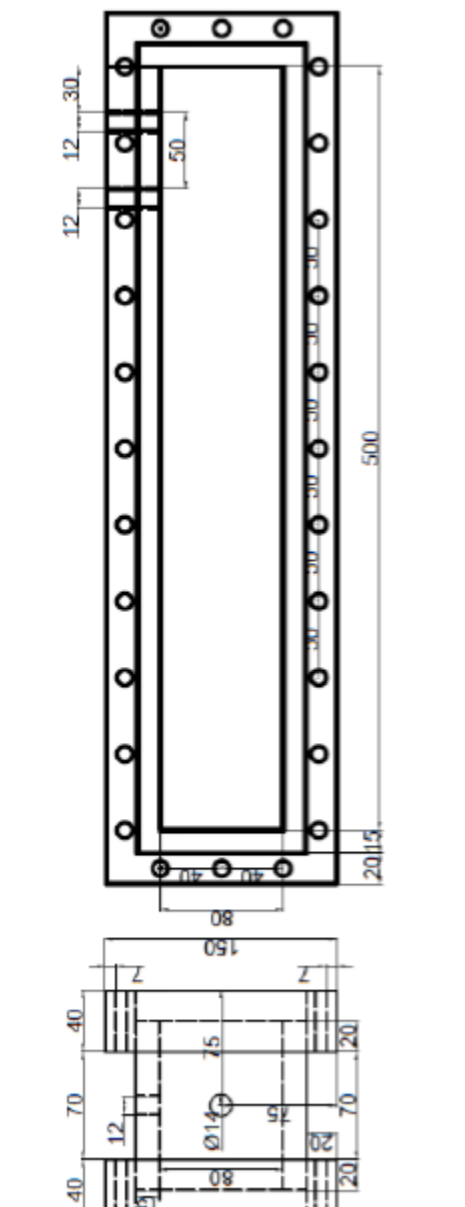
۶-۲- پیشنهادات

برای کسب نتایج بهتر در تحقیقات آینده، پیشنهاداتی به شرح ذیل مطرح می شود:

- در طی احتراق مخلوط گاز متان و هوا آلاینده هایی از قبیل CO و NO_x تولید می شود. پیشنهاد می شود با استفاده از کروماتوگرافی گاز، اثر موانع متخلخل بر انتشار آلاینده های گازی در طی احتراق مورد بررسی قرار گیرد.
- حداقل انرژی و زمان تأخیر احتراق یکی از پارامترهای مهم در بررسی احتراق مخلوط متان و هوا می باشد. پیشنهاد می شود اثر این پارامتر در احتراق مخلوط فوق مورد بررسی قرار بگیرد.
- در این تحقیق از سوخت گازی متان به عنوان سوخت کمکی استفاده شده است. پیشنهاد می شود در تحقیقات بعدی از سوخت هایی از قبیل اتان، پروپان و ترکیب این دو گاز با متان مورد بررسی قرار بگیرد.
- موضوع بعدی برای ادامه این تحقیق، شبیه سازی احتراق مخلوط گاز متان و هوا با حضور موانع و بررسی الگوی خاموشی شعله است.
- پیشنهاد می گردد در تحقیقات بعدی موج شوک حاصل از احتراق مورد بررسی قرار گیرد.
- پیشنهاد می شود در بررسی اثر تکرار موانع، به جای استفاده از موانع مشابه در طول محفظه، از موانعی با قطر و ضخامت و جنس مختلف استفاده شود.
- با توجه به ابعاد محفظه، بهتر است برای بهبود عکسبرداری از یک لنز با فاصله کانونی ۳۵ تا ۵۰ میلی متر استفاده شود.
- از آنجا که خاموشی شعله به پارامترهای مختلفی بستگی دارد، پیشنهاد می شود که یک اندیس کمی برای خاموشی شعله تعریف شود

پیوست

پیوست الف) نقشه محفظه احتراق



High-quality pressure transmitter For general industrial applications Model S-10

WIKA data sheet PE 81.01



for further approvals
see page 6

Applications

- Machine building
- Hydraulics and pneumatics
- Pumps
- Chemical industry

Special features

- Measuring ranges from 0 ... 0.1 to 0 ... 1,000 bar [0 ... 5 psi to 0 ... 15,000 psi]
- Non-linearity 0.2 % of span (BFSL)
- Output signals: 4 ... 20 mA, DC 0 ... 10 V, DC 0 ... 5 V and others
- Electrical connections: Angular connector form A, circular connector M12 x 1, various cable outlets and others



Pressure transmitter model S-10

Description

The model S-10 pressure transmitter for general industrial applications is the ideal solution for customers with demanding measuring requirements. It features a very good accuracy, a robust design and an exceptional number of variants, meaning it can be suited to the widest range of applications.

Versatile

The model S-10 offers continuous measuring ranges between 0 ... 0.1 and 0 ... 1,000 bar [0 ... 5 psi and 0 ... 15,000 psi] in all the major units. These measuring ranges can be combined in almost any way with all the standard industry output signals, the most common international process connections and a wide number of electrical connections. Furthermore, it offers numerous options, such as different accuracy classes, extended temperature ranges and customer-specific pin assignments.

High quality

The robust design turns the model S-10 into a very high quality product, which even the most adverse environmental conditions cannot affect. Whether with the lowest temperatures when used outdoors, with extreme shock and vibration in machine building or with aggressive media in the chemical industry, this transmitter can meet all requirements.

Availability

All variants described in this data sheet are available on very short lead times. For particularly urgent demands, there is a sizeable stock available.

ادامہ پیوست ب) مشخصات فنی مبدل فشار

Measuring ranges

Gauge pressure							
bar	Measuring range	0 ... 0.1	0 ... 0.16	0 ... 0.25	0 ... 0.4	0 ... 0.6	0 ... 1
	Overload safety	1	1.5	2	2	4	5
	Measuring range	0 ... 2.5	0 ... 4	0 ... 6	0 ... 10	0 ... 16	0 ... 25
	Overload safety	10	17	35	35	80	50
	Measuring range	0 ... 60	0 ... 100	0 ... 160	0 ... 250	0 ... 400	0 ... 600
	Overload safety	120	200	320	500	800	1,200
psi	Measuring range	0 ... 5	0 ... 10	0 ... 15	0 ... 20	0 ... 25	0 ... 30
	Overload safety	29	29	72.5	145	145	145
	Measuring range	0 ... 60	0 ... 100	0 ... 150	0 ... 160	0 ... 170	0 ... 200
	Overload safety	240	500	500	1,160	1,160	1,160
	Measuring range	0 ... 300	0 ... 400	0 ... 500	0 ... 600	0 ... 750	0 ... 800
	Overload safety	1,160	1,160	1,160	1,160	1,740	1,740
	Measuring range	0 ... 1,500	0 ... 1,600	0 ... 2,000	0 ... 3,000	0 ... 4,000	0 ... 5,000
	Overload safety	2,900	4,600	4,600	7,200	7,200	11,600
	Measuring range	0 ... 7,500	0 ... 8,000	0 ... 10,000	0 ... 15,000		
	Overload safety	17,400	17,400	17,400	21,700		
	Measuring range						
	Overload safety						

Absolute pressure							
bar	Measuring range	0 ... 0.25	0 ... 0.4	0 ... 0.6	0 ... 1	0 ... 1.6	0 ... 2.5
	Overload safety	2	2	4	5	10	10
	Measuring range	0 ... 6	0 ... 10	0 ... 16	0 ... 25	0 ... 40	0 ... 60
	Overload safety	35	35	80	80	5	
	Measuring range	0 ... 15	0 ... 25	0 ... 50	0 ... 100	0 ... 250	
	Overload safety	72.5	145	240	500	1,160	
psi	Measuring range						
	Overload safety						

Vacuum and +/- measuring range						
bar	Measuring range	-0.6 ... 0	-0.4 ... 0	-0.25 ... 0	-0.16 ... 0	-0.1 ... 0
	Overload safety	4	2	2	1.5	1
	Measuring range	-1 ... 0	-1 ... +0.6	-1 ... +1.5	-1 ... +3	-1 ... +5
	Overload safety	5	10	10	17	35
	Measuring range	-1 ... +9	-1 ... +15	-1 ... +24		
	Overload safety	35	80	50		
psi	Measuring range	-15 inHg ... 0	-30 inHg ... 0	-30 inHg ... +15	-30 inHg ... +30	-30 inHg ... +60
	Overload safety	72.5	72.5	145	240	240
	Measuring range	-30 inHg ... +100	-30 inHg ... +160	-30 inHg ... +200	-30 inHg ... +300	
	Overload safety	500	1,160	1,160	1,160	
	Measuring range					
	Overload safety					

The given measuring ranges are also available in kg/cm² and MPa.
Other measuring ranges available on request.

پیوست ج) گواهی کالیبراسیون مبدل فشار



شرکت کاوش افزار سهند
خدمات کالیبراسیون



Page 1 of 1

شرایط کالیبراسیون استاندارد مرجع: شرایط محیطی: دمای متوسط 20 ± 2 درجه سلسیوس و رطوبت نسبی $45 \pm 15\%$ روش کالیبراسیون: کالیبراسیون فشار سطح های الکتریکی با شماره مدرک CS-W06-00 کالیبراسیون انجام شده قابلیت ردیابی به استانداردهای ملی و بین المللی را دارا می باشد عدم قطعیت اندازه گیری با سطح اطمینان 95% و $K=2$ برابر $\pm 0.05 \text{ bar}$ برآورد شده است.	نتایج کالیبراسیون <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="2">مقدار خوانده شده (درگیت)</th> <th colspan="2">مقدار خوانده شده (در بار)</th> <th>مقدار مرجع</th> <th rowspan="2">%</th> <th rowspan="2">ردیف</th> </tr> <tr> <th>bar</th> <th>mA</th> <th>bar</th> <th>mA</th> <th>bar</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-0.001</td> <td>3.999</td> <td>-0.002</td> <td>3.997</td> <td>0.000</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2.489</td> <td>7.982</td> <td>2.488</td> <td>7.981</td> <td>2.500</td> <td>25</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>4.981</td> <td>11.970</td> <td>4.982</td> <td>11.971</td> <td>5.000</td> <td>50</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>7.474</td> <td>15.958</td> <td>7.475</td> <td>15.960</td> <td>7.500</td> <td>75</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>9.957</td> <td>19.931</td> <td>9.958</td> <td>19.932</td> <td>10.000</td> <td>100</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table> تعداد تشخیص و پایش انجام شده توسط دستگاه کالیبراسیون	مقدار خوانده شده (درگیت)		مقدار خوانده شده (در بار)		مقدار مرجع	%	ردیف	bar	mA	bar	mA	bar	-0.001	3.999	-0.002	3.997	0.000	0	1	2.489	7.982	2.488	7.981	2.500	25	2	4.981	11.970	4.982	11.971	5.000	50	3	7.474	15.958	7.475	15.960	7.500	75	4	9.957	19.931	9.958	19.932	10.000	100	5
مقدار خوانده شده (درگیت)		مقدار خوانده شده (در بار)		مقدار مرجع	%	ردیف																																										
bar	mA	bar	mA	bar																																												
-0.001	3.999	-0.002	3.997	0.000	0	1																																										
2.489	7.982	2.488	7.981	2.500	25	2																																										
4.981	11.970	4.982	11.971	5.000	50	3																																										
7.474	15.958	7.475	15.960	7.500	75	4																																										
9.957	19.931	9.958	19.932	10.000	100	5																																										

این گواهینامه بدون مهر آزمایشگاه فاقد اعتبار است.

استفاده کننده باید بر دامنه زمانی معین نسبت به کالیبراسیون پیوسته اقدام کند.

هر گونه تسخیر برداری از این گواهی باید به طور کامل و از تمامی صفحات باشد.

خیابان استاد مطهری - خیابان مفتاح کوچه مرزبان نامه - پلاک ۲۴

تلفن: ۸۸۸۱۴۳۶۰ - تلفکس: ۸۸۲۰۴۹۸۹

شماره فرم: CS-F46-00

www.caltex.net info@caltex.net

ADAM-6017

8-ch Isolated Analog Input Modbus TCP Module with 2-ch DO

FCC CE  



Main Features

NEW

- 8-ch AI, 2-ch DO Ethernet-based smart I/O
- Remote monitoring and control with mobile devices
- Group configuration capability for multiple module setup
- Flexible user-defined Modbus address
- Intelligent control ability by Peer-to-Peer and GCL function
- Active I/O message by data stream or event trigger function
- Multiple protocol support: Modbus TCP, TCP/IP, UDP, HTTP, DHCP
- Web language support: XML, HTML 5, Java Script

Introduction

ADAM-6000 accomplishes the integration of automation and enterprise systems easily through internet technology, so that users can avoid changing the entire architecture of the control system and even remotely monitor the device status more flexibly. ADAM-6000 modules are empowered by peer-to-peer (P2P) and Graphic Condition Logic (GCL), and can perform as standalone products for measurement, control and automation. Instead of having additional controllers or programming, system configurations can be done in an extremely short time with the easy-to-use and intuitive graphic utility.

Features

Group Configuration Capability for Multiple Module Setup

To aid configuration and save time, engineers can configure and upgrade the firmware of multiple ADAM-6000s simultaneously.



Remote Monitoring and Control with Smart Phone

With support for HTML5, the ADAM-6000 can be monitored and controlled from any browser on mobile devices whilst in the field and when the engineer is connected to their network.



Advanced Security and High Reliability

ADAM-6000 Ethernet I/O modules have fast response time, and advanced security and reliability. When communication is broken, the digital output module can generate pre-defined values to ensure safety.



Peer-to-Peer

Modules will actively update the input channel status to specific output channels. Without dealing with the trouble of long distance wiring, users can define the mapping between a pair of modules.

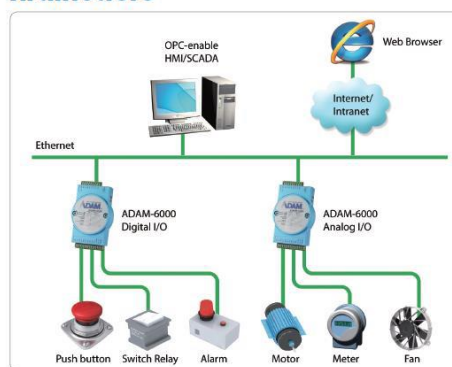


Graphic Condition Logic

Users can define the control logic rules through graphical configuration Utility, and download defined logic rules to specific ADAM module. Then, it will execute the logic rules automatically just like a standalone controller.



Architecture



ADVANTECH Ethernet I/O Modules

All product specifications are subject to change without notice

More Information [Click Here](#)

Last updated : 10-Jun-2014

technical data

image sensor S1/S4

type of sensor	CMOS
image sensor	proprietary
resolution (h x v)	1008 x 1008 pixel S1 2016 x 2016 pixel S4
pixel size (h x v)	11 µm x 11 µm
sensor format / diagonal	11.1 mm x 11.1 mm /15.7 mm S1 22.16 mm x 22.16 mm /31.36 mm S4
shutter mode	global (snapshot)
MTF	45.5 lp/mm (theoretical)
fullwell capacity	36000 e ⁻
readout noise	23 e ⁻ rms @ 62.5 MHz (typ.) 18 e ⁻ rms @ 62.5 MHz (CDI ¹ , typ.)
dynamic range	1600 : 1 (64 dB) 2000 : 1 (66 dB, CDI ¹)
quantum efficiency	50 % @ peak
spectral range	290 nm ... 1100 nm
dark current	530 e ⁻ /pixel/s @ 20 °C
DSNU	< 0.6 onts. rms @ 90 % center zone
PRNU	< 1 % @ 80 % signal

camera S1/S4

max. frame rate	4467 fps (mono) 4467 fps (color) S1 1279 fps (mono) 1102 fps (color) S4
exposure/shutter time	1.5 µs ... 40 ms
dynamic range A/D	12 bit
A/D conversion factor	8.8 e ⁻ /count
pixel scan rate	62.5 MHz (mono/color) S1 62.5 MHz (mono) / 55 MHz (color) S4
pixel data rate	4539 Mpixel/s (mono/color) S1 5198 Mpixel/s / 4479 Mpixel/s S4
region of interest	steps of 48 x 4 pixel (centered)
non linearity	< 0.5 % (diff.) / < 0.2 (integr.)
primary image memory (camRAM)	9 GB / 18 GB / 36 GB
trigger input signals	frame trigger, sequence trigger, stop trigger ²
trigger output signals	exposure, busy
data interface	USB 3.0, GigE/USB 2.0, HD-SDI, CameraLink
time stamp	in image (1 µs resolution)
time code input	IRIG-B (modulated & unmodulated)
interfering time ³	3.15 µs (S4 mono, S1 mono/color) 3.58 µs (S4 color)
operational shock	30 g @ 11 ms, half sine wave, all axes
operational vibration	25 g @ 1 - 150 Hz, all axes

general S1/S4

power supply	90 ... 280 VAC (12 VDC opt.)
power consumption	80 W (120 W with battery ⁴)
weight	7.9 kg
operating temperature	+ 5 °C ... + 40 °C
operating humidity range	10 % ... 90 % (non-condensing)
storage temperature range	- 20 °C ... + 70 °C
optical interface	F-mount (std.) / C-mount (opt.)
CE / FCC certified	yes

frame rate table⁵

typical examples (pixel)	frame rate monochrome (color)	images in memory (36GB)
--------------------------	-------------------------------	-------------------------

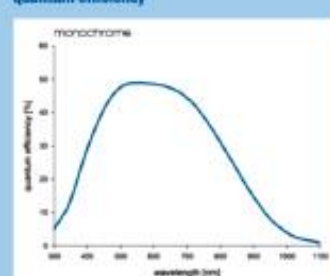
pco.dimax S1

1008 x 1008	4467 (4467) fps	25037
528 x 528	12932 (12932) fps	91208
480 x 240	27642 (27642) fps	222518
240 x 16	152811 (152811) fps	6675542

pco.dimax S4

2016 x 2016	1279 (1102) fps	6307
1020 x 1000	2470 (2128) fps	12362
1296 x 720	5085 (4349) fps	27471
1008 x 1008	4467 (3792) fps	25037
480 x 240	27642 (23061) fps	222518
240 x 16	152811 (130650) fps	6675542

quantum efficiency



¹ In correlated double image mode (CDI) the readout noise is reduced and therefore the maximum dynamic range is improved.

² All trigger input signals are optically isolated and various signal conditions can be selected (see: low level TTL, high level TTL, differential, 5V/0V and passive port/open circuit).

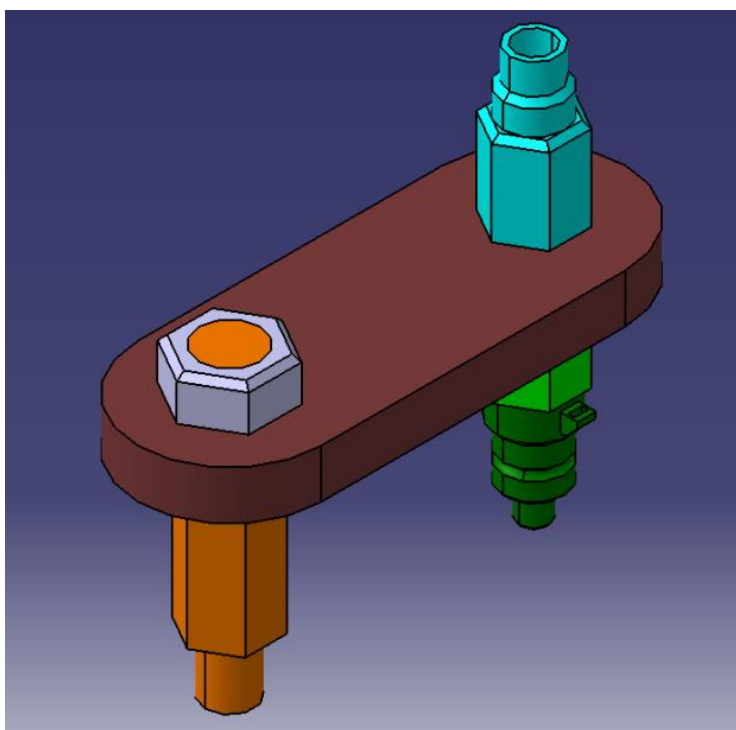
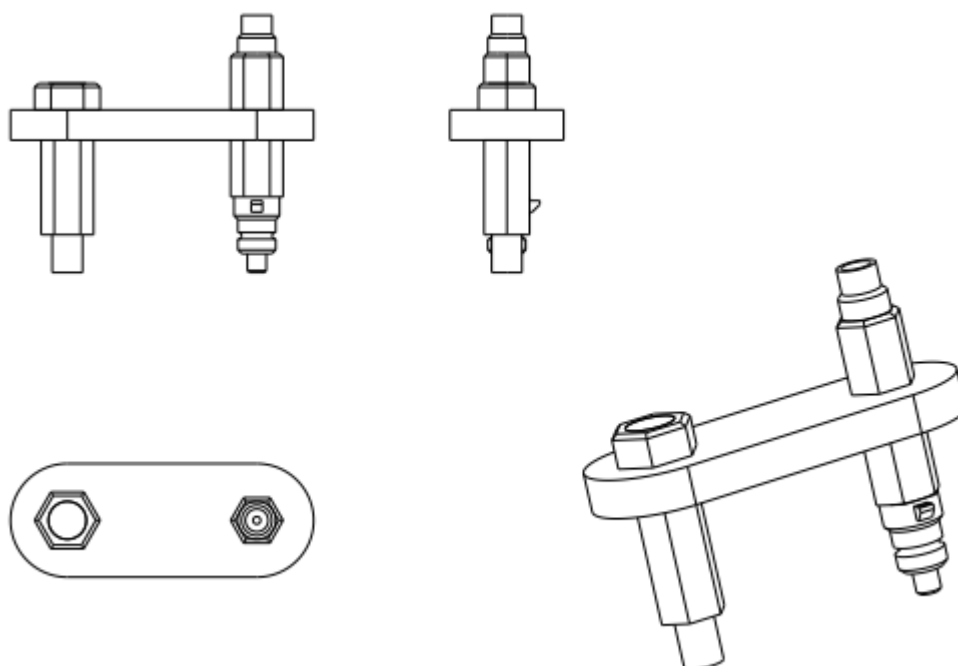
³ Time between two consecutive images for particle image velocimetry (PIV) applications.

⁴ The given measurements are selected for the frame rate calculations only, they are not mandatory.

⁵ For region of interest (ROI) mode (see frame grabber).

⁶ Includes charging current.

پیوست (ز) مدل طراحی شده منی‌فولد سوخت و هوا در نرم افزار کتیا



مراجع

- [1]. Jhonson R.W., (1998), Handbook of fluid dynamics, Crc Press.
- [2]. Kuo K.K, (1988), Principles of Combustion.
- [3]. Frank W.L. and Rodgers S.A., (2012), NFPA Guide to Combustible Dusts. **National Fire Protection Association**, Quincy, MA.
- [4]. Abbasi T., Pasman H.J. and Abbasi S.A., (2010), A scheme for classification of explosions in the chemical process industry, **Journal of Hazardous Materials**, Vol 174, pp. 270–280.
- [5]. Ogle R.A., Dillon, S.E., Fecke, M., (2014), Explosion from a smoldering silo fire. **Process Safety**, Vol. 33, pp. 94-103.
- [6]. Galmiche B., Halter F. and Foucher F., (2012), Effect of high pressure, high temperature and dilution on laminar burning velocities and Markstein lengths of iso-octane/air mixtures, **Combustion and Flame**, Vol. 159, pp. 3286-3299.
- [7]. CSB, (2011), Case study—Hoeganaes Corporation: Gallatin, TN—metal dust flash fires and hydrogen explosion, **Chemical Safety and Hazard Investigation Board**. . Report No. 2011-4-I-TN. Washington, DC: U.S.
- [8]. Ranzi E., Frassoldati A., Grana R., Cuoci A., Faravelli T., Kelley A.P. and Law C.K., (2012), Hierarchical and comparative kinetic modeling of laminar flame speeds of hydrocarbon and oxygenated fuels, **Progress in Energy and Combustion Science**, Vol. 38, pp. 468–501.
- [9]. Chen C.F., Shu C.M., Wu H.C., Ho H.H. and Ho S.P., (2017), Ethylene gas explosion analysis under oxygen-enriched atmospheres in a 20-liter spherical vessel, **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**.
- [10]. Ranganathan S., Petrow D., Rockwell S. and Rangwala A., (2018), Turbulent burning velocity of methane–air–dust premixed flames, **Combustion and Flame**, Vol. 188, pp. 367–375.
- [11]. Zhang B., Xiu G.L. and Bai C.H., (2014), Explosion characteristics of argon/nitrogen diluted natural gas-air mixtures, **Fuel**, Vol. 124, pp. 125–132
- [12]. Ranganathan S., Petrow D., Rockwell S. and Rangwala A., (2018), Turbulent burning velocity of methane–air–dust premixed flames, **Combustion and Flame**, Vol. 188, pp. 367–375.
- [13]. Zheng Y.S., Han Li L. and Wang L., (2009), Mechanism research of gas and coal dust explosion, **Journal of Coal Science and Engineering**, Vol. 15, pp. 171-174.
- [14]. Eckhoff R.K., (2003), Dust Explosions in the Process Industries, third ed. **Gulf Professional Publishing/Elsevier**. (first ed. published in 1991, second ed. in 1997). ISBN:0- 7506-7602-7.
- [15]. Kauffman CW., (1981), Agricultural dust explosions in grain handling facilities. In: Fuel-air explosions, **Proceedings of the International Conference on Fuel-Air Explosions held at McGill University**, Montreal, Canada, pp. 305–47.

- [16]. Murty K.A., (1975), Introduction to Combustion Phenomena. CRC Press.
- [17]. Turns S.R., (2000), An Introduction to Combustion, 2nd, Boston.
- [18]. Glassman I., (1996), Combustion, third ed, Academic Press, San Diego.
- [19]. Law, C.K., (2006), Combustion Physics.
- [20]. Wu, Y., (2017), Experimental investigation of laminar flame speeds of kerosene fuel and second generation biofuels in elevated conditions of pressure and preheat temperature, Docteur de la Normandie Université, délivré par l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen.
- [21]. Poinot, T.T and Veynante, D., (2001), Theoretical and numerical combustion.
- [22]. Lee J.H.S., (2008), The Detonation Phenomenon. **Cambridge University Press**, Cambridge.
- [23]. Gerstein M., Levine O. and Wong E.L., 1951, Flame Propagation. The determination of fundamental burning velocities of hydrocarbons by a revised the method, **Journal of the American Chemical Society**, Vol. 73, pp. 418-422.
- [24]. Lawis, B., (1954), Selected Combustion problems, AGARD, Butterworths, London, England, pp.177.
- [25]. Li Y., Xu H, and Wang X., (2013), Experimental study on the influence of initial pressure on explosion of methane-coal dust mixtures, **Procedia Engineering**, Vol. 62, pp. 980 – 984.
- [26]. Dugger, G.L., Weast, R.C. and Heimel S., (1955), Flame velocity and preflame reaction in heated propane- air mixture, **Industrial and Engineering Chemistry**, Vol. 47, pp. 114-116.
- [27]. Kelley, A. and Law,C., (2009), Nonlinear effects in the extraction of laminar flame speeds from expanding spherical flames, **Combustion and Flame** , Vol. 156, no. 9, pp. 1844-1851.
- [28]. Chen, Z., (2010), Effects of radiation and compression on propagating spherical flames of methane/air mixtures near the lean flammability limit, **Combustion and Flame** , Vol. 157, no. 12, pp. 2267-2276.
- [29]. Egolfopoulos, F., Hansen, N., Ju, Y., Kohse-Höinghaus, K., Law, C.and Qi, F., (2014), Advances and challenges in laminar flame experiments and implications for combustion chemistry, **Progress in Energy and Combustion Science** , Vol. 43, pp. 36-67.
- [30]. Bouvet, N., Chauveau, C.and H. I., (2011), experimental studies of the fundamental flame speeds of syngas (H₂/CO)/air mixture, **proceedings of the combustion institute**, Vol. 33, pp. 913-920.
- [31]. Vagelopoulos, C and Egolfopoulos, F., (1994), Laminar flame speeds and extinction strain rates of mixtures of carbon monoxide with hydrogen, methane, and air, **Symposium (International) on Combustion** , Vol. 25, no. 1, pp. 1317-1323.

- [32]. Zhao, Z., Kazakov, A., LI, J. and Dryer, F. L., (2004), The initial temperature and N₂ dilution effect on the laminar speed of propane/air, **Combustion Science and Technology**, Vol. 176, no. 10, pp. 1705-1723.
- [33]. Botha, J. P. and Spalding, D. B., (1954), The Laminar Flame Speed of Propane/Air Mixtures with Heat Extraction from the Flame, **Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, Vol. 225, no. 1160, pp. 71-96.
- [34]. Maaren, A. V., Thung, D. S. and Goey, L. R. H. D., (1994), Measurement of Flame Temperature and Adiabatic Burning Velocity of Methane/Air Mixtures, **Combustion Science and Technology**, Vol. 96, no. 4-6, pp. 327-344.
- [35]. Bosschaart, K. and de Goey, L., (2004), "The laminar burning velocity of flames propagating in mixtures of hydrocarbons and air measured with the heat flux method," **Combustion and Flame**, Vol. 136, no. 3, pp. 261-269.
- [36]. Goswami, M., Bastiaans, R., Konnov, A. and de Goey, L., (2014), Laminar burning velocity of lean H₂-O mixtures at elevated pressure using the heat flux method, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol. 39, no. 3, pp. 1485-1498.
- [37]. Alekseev, V., (2015), laminar burning velocity of hydrogen and flame structure of related fuels for detailed kinetic model validation.
- [38]. Law, C., Ishizuka, S. and Cho, P., (1982), On the Opening of Premixed Bunsen Flame Tips, **Combustion Science and Technology**, Vol. 28, no. 3-4, pp. 89-96.
- [39]. Poinot, T., Veynante, D., (2005), Theoretical and numerical combustion, 2nd edn. Edwards RT Inc, Philadelphia.
- [40]. Vargas, A. C., García, A.M., Arrieta, C.E., Rio J.S. and Amell, A., (2020), Burning Velocity of Turbulent Methane/Air Premixed Flames in Subatmospheric Environments, **American Chemical Society**.
- [41]. Peters, N., (2000), Turbulent combustion. Cambridge University Press, Cambridge.
- [42]. Xiao, H., (2016), Experimental and numerical study of dynamics of premixed hydrogen-air flames propagating in ducts, springer theses: Recognizing Outstanding Ph.D. Research, Doctoral Thesis Accepted By University Of Science And Technology Of China, Hefei, China.
- [43]. Lipatnikov, A., (2012), Fundamentals of Premixed Turbulent Combustion, Cambridge University Press, Cambridge.
- [44]. Knudsen, V., (2006), Hydrogen gas explosions in pipelines modeling and experimental investigations, Thesis for the degree of philosophiae doctor, Norwegian University of Science and Technology
- [45]. Zhdanov, S.K., (1995), Nonlinear theory of Kelvin-Helmholtz instability, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 87, pp. 375-379.
- [46]. Wei, H., Li, K., Zhao, J., Zhou, L., (2020), Experimental investigation on the propagation of flow and flame in a confined combustion chamber equipped with a single-hole perforated plate, **International Journal of Energy**, Vol. 45, pp. 32664-32675.

- [47]. Trimis, D. and Durst, F, (2007), Combustion in a Porous Medium-Advances and Applications, **Combustion Science and Technology**, Vol.121, pp. 153-168.
- [48]. Ariff, M.M, Jason, S. D., Eddie, K., William, L. R., Deanna, A. L, (2019), Effect of propagation speed on the quenching of methane, propane and ethylene premixed flames between parallel flat plates, **Fuel**, Vol. 256.
- [49]. Williams, F.,(1985), Combustion theory. 2nd ed. New York, USA: Perseus Books.
- [50]. Boust, B., Sotton, J., Labuda, S.A., and Bellenoue, M, (2007), A thermal formulation for single-wall quenching of transient laminar flames, **Combustion and Flame**, Vol. 149, pp. 286-294.
- [51]. امامی کوبائی، س و مظاهری، ک، (۱۳۹۱)، بررسی عددی تأثیر نسبت انسداد و هندسه موانع بر شتاب گیری شعله و فشار حاصل از انفجار گازی، نشریه علمی پژوهشی سوخت و احتراق، سال پنجم، شماره دوم.
- [52]. Masri, A. R., Ibrahim, S. S., Nehzat, N. and Green, A. R., (2000), Experimental Study of Premixed Flame Propagation Over Various Solid Obstructions, **Experimental Thermal and Fluid Science**, Vol. 21, pp. 109-116.
- [53]. Mallard, E. and Le Chatelier, H.L., (1883), Recherches experimentales et theoriques sur la combustion des mélanges gazeux explosifs, Series 4. Annales des Mines, 8, 274– 618.
- [54]. Dunn-Rankin, D., and Sawyer, R. F., (1998), Tulip Flames: Changes in Shape of Premixed Flames Propagating in Closed Tubes, **Exp. Fluids**, Vol. 24, pp. 130–140.
- [55]. Naamansen, P., Baraldi, D., Hjertager, B. H., Solberg, T. and Cant, S., (2002), Solution Adaptive CFD Simulation of Premixed Flame Propagation Over Various Solid Obstructions, **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, Vol. 15, , pp. 189-197.
- [56]. Patel, S., Ibrahim, S. S., Yehia, M. A. and Hargrave, G. K., (2003), Investigation of Premixed Turbulent Combustion in a Semiconfined Explosion Chamber, **Experimental Thermal and Fluid Science**, Vol. 27, 2003, pp. 355-361.
- [57]. Di Sarli, V., Di Benedetto, A., Russo, G., Jarvis, S., Long, E. J. and Hargrave, G. K., (2009), Large Eddy Simulation and PIV Measurements of Unsteady Premixed Flames Accelerated by Obstacles, **Flow, Turbulence and Combustion**, Vol, 83, pp. 227-250.
- [58]. Di Sarli, V., Di Benedetto, A. and Russo, G., Using Large Eddy Simulation for Understanding Vented Gas Explosions in the Presence of Obstacles, **Journal of Hazardous Materials**, Vol. 169, pp. 435-442.
- [59]. Di Sarli, V., Di Benedetto, A. and Russo, G., (2010), Sub-grid Scale Combustion Models for Large Eddy Simulation of Unsteady Premixed Flame Propagation around Obstacles, **Journal of Hazardous Materials**, Vol. 180, pp. 71-78.
- [60]. Bellenoue M., Kageyama, T. Labuda S.A. and Sotton, J.(2003), Direct measurement of laminar flame quenching distance in a closed vessel, **Experimental Thermal and Fluid Science**, Vol. 27, pp. 323-331.

- [61]. Korzhavin, A. A., Bunev V. A., Babkin, V.S., and Klimenko A. S, (2005), Selective Diffusion during Flame Propagation and Quenching in a Porous Medium, **Fizika Goreniya i Vzryva**, Vol. 41, No. 4, pp. 50–59.
- [62]. Boust, B., Sotton, J., Labuda, S.A., and Bellenoue, M, (2007), A thermal formulation for single-wall quenching of transient laminar flames, **Combustion and Flame**, Vol. 149, pp. 286-294.
- [63]. Tang, F.D., Goroshin, S., Higgins, A. and Lee J., (2009), Flame propagation and quenching in iron dust clouds, **Proceedings of the Combustion Institute**, Vol. 32, pp. 1905-1912.
- [64]. Xiao, H, Wang, Q, He, X, Sun, J, Shen, X., (2011), Experimental study on the behaviors and shape changes of premixed hydrogen-air flames propagating in horizontal duct. **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol. 36, pp. 6325- 6336.
- [65]. Shen, X, Wang, Q, Xiao, H, Sun, J., (2012), Experimental study on the characteristic stages of premixed hydrogen-air flame propagation in a horizontal rectangular closed duct. **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol. 37, pp. 12028- 12038.
- [66]. Yang, S.I. and Hsu, D.L, (2013), Heat-transfer mechanisms of lean premixed CH₄/air flame in a ceramic granular bed burner, **Combustion and Flame**, Vol. 160, pp. 692–703.
- [67]. Gao, H.B., Qu, Z.G., Feng, X.B. and Tao, W.Q, (2013), Methane/air premixed combustion in a two-layer porous burner with different foam materials, **Fuel**, Vol.115, pp. 154-161.
- [68]. Palecka, J., Julien, P., Goroshin, S., Bergthorson, J.M., Frost, D.L. and Higgins, A.J, (2014), Quenching distance of flames in hybrid methane–aluminum mixtures, **Proceedings of the Combustion Institute**.
- [69]. هاشمی، ع. و نیکفر، م، ۱۳۹۲، بررسی تجربی پایداری شعله در محیط متخلخل فلزی- سرامیکی، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، سال سوم، شماره سوم، صفحات ۴۲-۵۱.
- [70]. Xiao H, Duan Q, Jiang L, Sun J., (2014), Effects of ignition location on premixed hydrogen/ air flame propagation in a closed combustion tube. **International Journal of Hydrogen Energy** Vol. 39, pp. 8557- 8563.
- [71]. Chen P, Li Y, Guo S, Ji J., (2015), Experimental and Numerical study of premixed Methane/air flame propagation in Various L/D closed Ducts. **American Institute of Chemical Engineers, Process Safety Progress**, Vol. 35.
- [72]. Shen X, He Q, Sun J., (2015), A comparative study on premixed hydrogen–air and propane–air flame propagations with tulip distortion in a closed duct. **Int J Fuel**, Vol. 161, pp. 248-253
- [73]. Yu, M, Zheng, K., Zheng, L and Wen, X., (2016), Experimental study on premixed flame propagation of hydrogen/methane/air deflagration in closed ducts. **International Journal of Hydrogen Energy**.
- [74]. Chen P., Huang F., Sun Y. and Chen X, (2017), Effects of metal foam meshes on premixed methane-air flame propagation in the closed duct, **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, Vol. 47, pp. 22-28.

- [75]. Jin, Kaiqiang, Duan, Q, Chen, J., Liew K.M., Gong, L. and Sun, J., (2017), Experimental study on the influence of multi-layer wire mesh on dynamics of premixed hydrogen-air flame propagation in a closed duct, **International Journal of Energy**, pp. 1-12.
- [76]. Li, Q., Sun, X., Lu, Sh., Zhang, Zh, Wang, X., Han, S. and Wang, C, (2018), Experimental study of flame propagation across a perforated plate, **international journal of hydrogen energy**.
- [77]. Lei, W., Rongjun, S, Runzhi, L and Yan, H., (2018), Experimental investigation of the propagation of deflagration flames in a horizontal underground channel containing obstacles, **Tunneling and Underground Space Technology**, Vol.78, pp. 201–214.
- [78]. Lu-Qing W., Hong-Hao M. and Zhao-Wu S, (2019), On the explosion characteristics of hydrogen-air mixtures in a constant volume vessel with an orifice plate, **International Journal of Hydrogen Energy**.
- [79]. Lei, Z., Lijia, Z., Jianfu, Z., Jiaying, P., Zailong, X. and Haiqiao, W, (2019), Flame Propagation and Combustion Phenomena in a Confined Space with the Perforated Plate at Different Positions, **Combustion Science and Technology**.
- [80]. Kolahdooz, H., Nazari, M., Kayhani, M.H., Ebrahimi, R. and Askari, O, (2019), Effect of Obstacle Type on Methane-Air Flame Propagation in a Closed Duct: An Experimental Study, **Journal of Energy Resources Technology**.
- [81]. Ariff, M.M, Jason, S. D., Eddie, K., William, L. R., Deanna, A. L, (2019), Effect of propagation speed on the quenching of methane, propane and ethylene premixed flames between parallel flat plates, **Fuel**, Vol. 256.
- [82]. Wang, Y., Zhang, X., Li, Y. and Siyu, Q., (2020), Experimental study on premixed turbulent flame of methane/air in a spherical closed chamber, **Energy Conversion and Management**, Vol. 222, pp. 113-219.
- [83]. Jin, K., Wang, Q., Duan, Q and Sun, J., (2020), Effect of single-layer wire mesh on premixed methane/air flame dynamics in a closed pipe, **International Journal of Energy**, pp. 32664-32675.
- [84]. Wei, H., Li, K., Zhao, J., Zhou, L., (2021), Experimental investigation on the propagation of flow and flame in a confined combustion chamber equipped with a single-hole perforated plate, **International Journal of Energy**, Vol.45, pp. 32664-32675.
- [85]. تیماچی، م و مظاهری ک، (۱۳۹۱)، مدلسازی شتاب گیری شعله در انفجار ابر گازی در مقیاس بزرگ به وسیله مدل احتراقی ترکیبی جدید، نشریه علمی پژوهشی سوخت و احتراق، سال پنجم، شماره اول.
- [86]. Varea, E., Modica, V., Renou B. and Boukhalfa, A.M., (2013), Pressure effects on laminar burning velocities and Markstein lengths for isooctane-ethanol-air mixtures, **Proceedings of the Combustion Institute**, Vol., 34, pp. 735-744.
- [87]. Galmiche, B., Halter, F. and Foucher, F., (2012), Effect of high pressure, high temperature and dilution on laminar burning velocities and Markstein lengths of iso-octane/air mixtures, **Combustion and Flame**, Vol. 159, pp. 3286-3299.

- [88]. Ma, X., Jiang, C., Xu, H., Ding, H. and Shuai, S., (2014), Laminar burning characteristics of 2-methylfuran and isooctane blend fuels, **Fuel**, Vol. 116, pp. 281-291.
- [89]. Moran, M.J., Shapiro, H.N., Boettner, D.D. and Bailey, M. (2010), Fundamentals of engineering thermodynamics. In: Cabral, S. 7th (ed.): **Ideal Gas Mixture and Psychrometric Applications**, Wiley Publ. Co., 110 p.
- [90]. حسین پور، س و معلمی خیاوی، ن، (۱۳۸۹)، شبیه‌سازی عددی احتراق در محیط متخلخل در حالت دو بعدی با استفاده از چهار ساز و کار شیمیایی چند مرحله‌ای مختلف، نشریه علمی پژوهشی سوخت و احتراق، سال سوم، شماره اول.
- [91]. Matalon, M., and Metzener, P., (1997), The Propagation of Premixed Flames in Closed Tubes, **J. Fluid Mech.**, Vol. 336, pp. 331–350.
- [92]. Zheng, K., Yu, M., Zheng, L., Wen, X., Chu, T., and Wang, L., (2017), Experimental Study on Premixed Flame Propagation of Hydrogen/Methane/Air Deflagration in Closed Ducts, **Int. J. Hydrogen Energy**, Vol. 42, pp. 5426–5438.
- [93]. Xiao, H., Makarov, D., Sun, J., and Molkov, V., (2012), Experimental and Numerical Investigation of Premixed Flame Propagation with Distorted Tulip Shape in a Closed Duct, **Combustion and Flame**, Vol. 159, pp. 1523–1538
- [94]. Jin, K., Duan, Q., Liew, K. M., Peng, Z., Gong, L., and Sun, J., (2017), Experimental Study on a Comparison of Typical Premixed Combustible Gas-Air Flame Propagation in a Horizontal Rectangular Closed Duct, **J. Hazard and Material**, Vol. 327, pp. 116–126.
- [95]. Chen, P., Li, Y., Guo, S., and Ji, J., (2016), Experimental and Numerical Study of Premixed Methane/Air Flame Propagating in Various L/D Closed Ducts, **Process Saf. Prog.**, Vol. 35, pp. 185–191.
- [96]. Wen, X., Xie, M., Yu, M., Li, G. and Ji W., (2013), Porous media quenching behaviors of gas deflagration in the presence of obstacles, **Experimental Thermal and Fluid Science**, Vol. 50, pp. 37–44.
- [97]. Bychkov, V., Akkerman, V.y., Fru, G., Petchenko, A., and Eriksson, L.E., (2007), Flame acceleration in the early stages of burning in tubes, **Combustion and Flame**, Vol. 150, pp. 263-276.
- [98]. Scholtissek, A., Popp, S., Hartl, S., Olguin, H. and Hasse, C., (2020), Derivation and analysis of two-dimensional composition space equations for multi-regime combustion using orthogonal coordinates, **Combustion and Flame**, Vol. 218, pp. 205-217.
- [99]. Hui, T., Yu, D. and Hao, Z., (2020), Three-dimensional numerical analysis on combustion performance and flow of hybrid rocket motor with multi-segmented grain, **Chinese Journal of Aeronautics**, Vol. 33, pp. 1181-1191.

Abstract

Given the importance of combustion of gases, which is an important issue in the field of production, transmission and operation, the study and prediction of flame behavior and conditions affecting it is very important. Flame behavior in a closed and confined environment is more complex than in an open environment. Therefore, focusing on this process requires special attention. Under certain conditions, if a weak energy source is created as a spark inside the gaseous mixture, a slow flame front is formed and the combustion process begins. As a result of conditions such as turbulence and boundary conditions of the walls, the flame has the ability to change from quiet to turbulent and eventually to explode, which is a destructive and dangerous phenomenon. The process of diffusion of the flame front inside the gas mixture depends on the type of flow and the chemical nature of the gas fuel and the prevailing boundary conditions, which causes various instabilities in the flame front and the speed of propagation of the flame front depends on this. One of the factors intensifying the damage is the existence of numerous obstacles in the path of flame propagation. Due to the presence of obstacles in the flow path created in front of the flame, vortices are produced behind them. These vortices cause the flame surface to become wrinkled and wrinkled, or even, depending on the intensity of the flow turbulence, to cause the flame front to split into smaller fronts. This increases the surface area of the flame and consequently increases the burning rate. Also, with the entry of small-scale vortices into the flame structure (preheating zone or even the reaction zone), the overall thickness of the flame increases and the rate of heat and mass transfer to the preheating zone intensifies. However, the entry of high-velocity vortices into the flame structure, depending on the local strain rate, may also cause the flame to go out. Therefore, it is important to study the effect of barriers on combustion parameters. Therefore, in this paper, the effect of barriers such as perforated plates and porous barriers on the emission of methane and air pre-mixed flame fronts in a closed channel has been studied. For this purpose, a constant volume combustion device was used to perform the combustion test and check the combustion parameters such as flame propagation process, combustion chamber pressure and flame tip velocity and finally the effect of number of obstacles, thickness of obstacles, diameter of obstacles, distance between obstacles and distance. The above combustion parameters were measured and recorded from the combustion source. According to the results, the turbulence created in the flow field has increased with the repetition of obstacles so that in the presence of an obstacle, the maximum propagation speed is 8.5 m / s , while with the repetition of obstacles with

the same diameter and thickness as It has reached 12.5 meters per second. Also, by reducing the pore size of the perforated plates to 2 mm, due to the reduction of thermal energy inside the chamber, the flame is extinguished after hitting the first perforated barrier. In addition to the diameter of perforated barriers, the thickness of the barriers is also effective in extinguishing the flame, so that in similar conditions, the flame is extinguished after hitting a perforated barrier with a pore size of 3 mm with a thickness of 4 mm. Which was passed after colliding with the same obstacle but with a thickness of 2 mm. In flame extinguishing, two patterns of head on and sidewall extinction can be seen. Spark arrest distance is effective in converting these extinguishing patterns so that by increasing the ignition distance, the head on extinguishing pattern becomes sidewall. To investigate the similarity of the performance of the porous barrier with the perforated barrier, a 2 mm porous barrier with similar material, thickness and porosity was designed and constructed. According to the test results, the 2 mm porous barrier, like the 2 mm perforated barrier, extinguished the flame in different positions of the ignition system. Therefore, porous media with higher pore density have a good performance in flame extinction due to having a larger effective internal surface area for convective heat transfer between the porous medium and the flame. Therefore, it can be used in various industries such as mines, petrochemicals, etc. where the risk of combustion and explosion is high.

Keywords: Combustion chamber, Methane and air mixture, Perforated plates, Porous barrier, Flame quenching, Quenching pattern.



Shahrood University of Technology

PHD Thesis

**Laboratory study of the effect of perforated plates and
porous barriers on the profile of methane-air premix flame
front in a closed chamber**

Author:

Hadi Younesian

Supervisors:

Prof. Mohammad Mohsen Shahmardan

Prof. Mohsen Nazari

Date: February 2022