

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی

رساله دکتری

**مطالعه آزمایشگاهی اثر مانع متخلخل بر انتشار شعله پیش آمیخته متان-هوا
در یک کانال بسته**

نگارنده: حبیب کلاهدوز

اساتید راهنما

دکتر محمد حسن کیهانی

دکتر محسن نظری

استاد مشاور

دکتر رضا ابراهیمی

تیر ماه ۱۳۹۸

ب

تصویب نامه:



مدیریت تحصیلات تکمیلی

باسمه تعالی

شماره: _____
تاریخ: _____
ویرایش: _____

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای حبیب کلاهدوز دانشجوی دکتری رشته مکانیک- تبدیل انرژی به شماره دانشجویی ۹۳۰۱۲۲۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۳ در تاریخ ۱۳۹۸/۰۴/۲۰ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: مطالعه آزمایشگاهی اثر مانع متخلخل بر انتشار شعله پیش آمیخته متان-هوا در یک کانال بسته دفاع و با اخذ نمره ۱۹.۵۷ به درجه عالی نائل گردید.

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷
 ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵ د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
 ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبۀ علمی	امضاء
۱	دکتر محمد حسن کیهانی	استاد راهنمای اول	استاد	
۲	دکتر محسن نظری	استاد راهنمای دوم	دانشیار	
۳	دکتر رضا ابراهیمی	استاد مشاور	استاد	
۴	دکتر کیومرث مظاهری بادی	استاد مدعو خارجی	استاد	
۵	دکتر محمود چهارطاقی	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۶	دکتر سید وحید حسینی	استاد مدعو داخلی	استادیار	
۷	دکتر احمد نظری	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای حبیب کلاهدوز بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: _____
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: _____



تقدیم به:

مادر و پدر مهربانم، که همواره در تمامی مراحل زندگی تکیه گاه من بوده اند و همچنین تقدیم به روان برادرم داوود که همواره

یادش برای من زنده است.

شکر و قدردانی:

در اینجا لازم می‌دانم از اساتید عزیز و گرامی: آقای دکتر کیهانی، آقای دکتر نظری و آقای دکتر ابراهیمی که نقش بسیاری در به سرانجام رسیدن این پژوهش داشته‌اند ابراز تشکر و سپاس فراوان خودم را داشته باشم. همچنین تشکر و سپاس صمیمانه از آقای دکتر امید عسکری، که در مراحل از تحقیق حاضر مشاوره و همکاری داشته‌اند را دارم.

تهیه‌نامه

اینجانب حبیب کلاهدوز دانشجوی دوره دکتری رشته مکانیک-تبدیل انرژی دانشکده مکانیک و مکترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه مطالعه آزمایشگاهی اثر مانع متخلخل بر انتشار شعله پیش آمیخته متان-هوا در یک کانال بسته تحت راهنمایی آقای دکتر کیهانی و آقای دکتر نظری متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، 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

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده:

با توجه به اهمیت احتراق گازها که یک مسئله مهم در زمینه تولید، انتقال و بهره‌برداری از آنها است، مطالعه و پیش‌بینی رفتار شعله و شرایط تأثیرگذار بر آن بسیار حائز اهمیت می‌باشد. رفتار شعله در یک محیط بسته دارای پیچیدگی بیشتری نسبت به احتراق در محیط باز است، از این رو تمرکز بر روی این فرایند نیازمند توجه ویژه‌ای است. تحت شرایطی در صورت ایجاد یک منبع انرژی ضعیف به‌عنوان جرقه در داخل مخلوط پیش‌آمیخته‌گازی، جبهه شعله آرام شکل گرفته و فرایند احتراق شروع می‌گردد. در نتیجه فراهم شدن شرایط از جمله آشفته‌گی جریان و شرایط مرزی دیواره‌ها، شعله توانایی این را دارد که از حالت آرام به حالت شعله‌وری سریع و نهایتاً تبدیل به انفجار شود که این پدیده بسیار مخرب و خطرآفرین است. فرایند انتشار جبهه شعله در داخل مخلوط گازی وابسته به نوع جریان و ماهیت شیمیایی سوخت گازی و شرایط مرزی حاکم متفاوت بوده که موجب ناپایداری‌های گوناگون در جبهه شعله می‌گردد و سرعت انتشار جبهه شعله شدیداً به این امر وابسته است. با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده در گذشته که در بخش مربوط بیان شده، جای مطالعه اثرات محیط متخلخل بر میدان جریان احتراقی و مشخصات شعله از جمله تغییرات فشار، سرعت سوختن و ساختار جبهه شعله خالی است و کار حاضر بررسی آزمایشگاهی انتشار جبهه شعله پیش‌آمیخته متان-هوا در یک کانال بسته و تأثیر محیط متخلخل بر ساختار جبهه شعله و پارامترهای مؤثر بر انتشار آن است. اثرات محیط متخلخل به‌صورت ایجاد مانع‌های متخلخل در مسیر رشد شعله و میدان جریان در یک محفظه بسته به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه شده است. اثر این مانع‌ها در چهار فاصله مختلف از محل جرقه به‌صورت، حالت ۱: ۵ cm، حالت ۲: ۱۰ cm، حالت ۳: ۱۵ cm و حالت ۴: ۲۰ cm بررسی شده است. تأثیر مانع‌های متخلخل با در نظر گرفتن ارتفاع‌های مختلف (۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ میلی‌متر) آن نیز بررسی شده است. جهت تمرکز بر اثرات مانع متخلخل نیز برای یک نمونه با ارتفاع ۲۰ میلی‌متر از مانع صلب که از جنس چوب انتخاب شده نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده بیان‌گر این واقعیت است که میزان

آشفتگی ایجادشده در میدان جریان توسط مانع‌های متخلخل سرعت فرایند انتشار شعله در داخل کانال را افزایش داده و عموماً شتاب مثبت اولیه شعله را نسبت به حالت بدون حضور مانع، برای مدت‌زمان بیشتری حفظ کرده و در بعضی موارد موجب افزایش شتاب شعله نیز شده است. محیط متخلخل در مقایسه با محیط صلب خاصیت ویژه داشته که در نتایج قابل‌مشاهده است و آن جلوگیری از تشدید موج‌های فشاری ایجادشده از فرآیند احتراق در میدان جریان است. دیده می‌شود که در مانع صلب موج‌های فشاری تقویت‌شده‌اند. افزایش اندازه ارتفاع مانع‌های متخلخل موجب افزایش آشفتگی در میدان جریان شده و ساختار انتشار جبهه شعله را تغییر داده است. در مورد تغییرات فشار داخل محفظه نیز حضور مانع‌ها تأثیر قابل‌توجهی داشته که موجب کاهش فشار حداکثری در داخل محفظه شده است. البته این مطلب قابل‌توجه است که مانع‌های متخلخل تأثیر کاهشی بیشتری بر روی حداکثر فشار ایجادشده در داخل محفظه، نسبت به مانع صلب داشته است. تغییر ارتفاع مانع‌های متخلخل نیز به‌طور عمومی با افزایش ارتفاع، فشار حداکثری ایجادشده در داخل محفظه، در زمان کوتاه‌تری شکل‌گرفته است. فشار داخل محفظه نیز برای حالت‌های ۱ تا ۴ در مانع متخلخل و ۱ تا ۳ در مانع صلب در زمان ۲۰۰ میلی‌ثانیه مقدار حداکثری خود را تجربه کرده است. برای حالت ۴ در مانع صلب زمان موردنظر ۱۰۰ میلی‌ثانیه بوده است و درواقع این شرایط آشفته‌ترین حالت در میان آزمایش‌های صورت گرفته بوده و افزایش فشار با سرعت بیشتری نسبت حالت‌های دیگر از نظر زمانی شکل‌گرفته است. حداکثر فشار ایجاد شده در داخل محفظه با حضور مانع متخلخل با ارتفاع ۲۰ در چهار حالت، نسبت به حالت بدون حضور مانع به ترتیب: ۶، ۹، ۳ و ۱۱ درصد کاهش داشته و با حضور مانع صلب به ترتیب ۲، ۰.۲، ۱ و ۲ درصد کاهش داشته است و دلیل فیزیکی آن اضافه شدن سطوح مانع‌ها در داخل محفظه بوده، که موجب افزایش اتلاف حرارتی مخلوط احتراقی و کاهش فشار آن شده است.

کلمات کلیدی: مخلوط متان-هوا؛ محفظه بسته؛ مانع متخلخل؛ مانع صلب.

لیست مقالات مستخرج از رساله

۱- Effect of Obstacle Type on Methane-Air Flame Propagation in a Closed Duct: An Experimental Study, H. Kolahdooz ^a, M. Nazari ^a, M.H. Kayhani ^a, R. Ebrahimi ^b and O. Askari, J. Energy Resour. Technol 141(11), 112208 (May 30, 2019)

۲- مطالعه آزمایشگاهی نحوه انتشار شعله پیش آمیخته متان-هوا در محفظه بسته با حضور مانع متخلخل، حبیب کلاهدوز، محمد حسن کیهانی، محسن نظری، رضا ابراهیمی، نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، ۱۳۹۷، (DOI(۱۰.۲۲۰۶۰/mej.۲۰۱۹.۱۵۲۶۱.۶۰۷۷)

۳- مطالعه آزمایشگاهی نحوه انتشار شعله پیش آمیخته متان-هوا در محفظه بسته با حضور مانع متخلخل، حبیب کلاهدوز، محمد حسن کیهانی، محسن نظری، رضا ابراهیمی، اولین کنگره ملی تازه یافته ها در مهندسی مکانیک و هوا فضا، ۱۳۹۷، تهران، دانشگاه خوارزمی

۴- مطالعه آزمایشگاهی نحوه انتشار شعله پیش آمیخته متان-هوا در محفظه بسته با حضور مانع متخلخل و صلب، حبیب کلاهدوز، محمد حسن کیهانی، محسن نظری، رضا ابراهیمی، دومین همایش ملی موتورهای درون سوز، ۱۳۹۷، بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

فهرست مطالب

م	فهرست شکل‌ها
ف	فهرست جداول
ف	فهرست علائم
۱	فصل ۱- مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- شعله پیش‌آمیخته آرام
۳	۱-۲-۱- ساختار شعله پیش‌آمیخته آرام
۴	۲-۲-۱- ضخامت شعله پیش‌آمیخته آرام (δ_L)
۶	۳-۲-۱- سرعت سوختن آرام در شعله پیش‌آمیخته
۹	۱-۳- ناپایداری شعله
۱۰	۱-۳-۱- ناپایداری لاند-داریوس (هیدرودینامیکی)
۱۱	۲-۳-۱- ناپایداری نفوذی-حرارتی
۱۲	۳-۳-۱- ناپایداری رایلی-تیلور
۱۳	۴-۳-۱- ناپایداری کلوین-هلمهولتز
۱۴	۴-۱- شعله پیش‌آمیخته آشفته
۱۷	۵-۱- الگوهای احتراق در انتشار شعله داخل یک کانال
۱۸	۶-۱- جمع‌بندی
۱۹	فصل ۲- پیشینه تحقیق
۲۰	۱-۲- مقدمه

۲۶	۲-۲-مروری بر کارهای گذشته.....
۳۴	۳-۲-جنبه‌های نوآوری پژوهش حاضر.....
۳۵	۴-۲-کاربردهای پژوهش.....
۳۷	فصل ۳- تجهیزات آزمایشگاهی و اهداف تحقیق.....
۳۸	۱-۳-مقدمه.....
۳۸	۲-۳-مدل آزمایشگاهی.....
۳۹	۱-۲-۳-مخلوط گازی.....
۴۱	۲-۲-۳-دوربین سرعت بالا.....
۴۱	۳-۲-۳-حسگر فشار.....
۴۲	۴-۲-۳-سیستم جرقه زن.....
۴۳	۵-۲-۳-محیط متخلخل.....
۴۴	۶-۲-۳-مانع صلب.....
۴۵	۷-۲-۳-آب‌بندی محفظه احتراق و اتصالات مربوطه.....
۴۶	۸-۲-۳-تحلیل خطاها و عدم قطعیت.....
۴۹	فصل ۴- نتایج.....
۵۰	۱-۴-مقدمه.....
۵۱	۲-۴-رفتار شعله بدون حضور مانع.....
۵۴	۳-۴-رفتار شعله با حضور مانع متخلخل و صلب با ارتفاع ۲۰ میلی‌متر.....
۶۶	۴-۴-رفتار شعله در اثر تغییر ارتفاع مانع متخلخل.....
۷۷	فصل ۵- بحث و نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....

- ۵-۱-مقدمه.....۷۸
- ۵-۲-نتیجه گیری برای اثر مانع های چوبی و متخلخل با ارتفاع ۲۰ میلی متر.....۷۸
- ۵-۳-نتیجه گیری برای اثر ارتفاع مانع متخلخل.....۸۰
- پیوست أ-تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۲۵ میلی متر و فاصله ۵ سانتی متر از محل جرقه.....۸۲
- پیوست ب-تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۳۰ میلی متر و فاصله ۵ سانتی متر از محل جرقه.....۸۳
- پیوست ج-تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۳۵ میلی متر و فاصله ۵ سانتی متر از محل جرقه.....۸۴
- پیوست د-تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۲۵ میلی متر و فاصله ۱۰ سانتی متر از محل جرقه.....۸۵
- پیوست ه-تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۳۰ میلی متر و فاصله ۱۰ سانتی متر از محل جرقه.....۸۶
- پیوست و-تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۳۵ میلی متر و فاصله ۱۰ سانتی متر از محل جرقه.....۸۷
- پیوست ز-تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۲۵ میلی متر و فاصله ۱۵ سانتی متر از محل جرقه.....۸۸
- پیوست ح-تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۳۰ میلی متر و فاصله ۱۵ سانتی متر از محل جرقه.....۸۹
- پیوست ط-تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۳۵ میلی متر و فاصله ۱۵ سانتی متر از محل جرقه.....۹۰
- پیوست ی-تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۲۵ میلی متر و فاصله ۲۰ سانتی متر از محل جرقه.....۹۱
- پیوست ک-تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۳۰ میلی متر و فاصله ۲۰ سانتی متر از محل جرقه...۹۲
- پیوست ل-تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۳۵ میلی متر و فاصله ۲۰ سانتی متر از محل جرقه.....۹۳
- پیوست م-مشخصات فنی مبدل فشار.....۹۴
- پیوست ن-گواهی کالیبراسیون مبدل فشار.....۱۰۳
- پیوست س-مشخصات فنی گیج فشار.....۱۰۴
- پیوست ع-مشخصات فنی دوربین پرسرعت.....۱۰۸
- پیوست ف-مشخصات فنی ثبت کننده اطلاعات.....۱۱۴
- پیوست ص- نقشه ی بدنه محفظه احتراق به همراه اندازه گذاری بر حسب میلی متر.....۱۱۴

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ - طرح ساده از ساختار جبهه شعله پیش‌آمیخته [۱]..... ۳
- شکل ۱-۲ - ساختار جبهه شعله-پروفیل دما و نرخ تولید حرارت بر اساس نتایج آزمایشگاهی فریدمن و بورک [۲]..... ۴
- شکل ۱-۳ - شماتیک جبهه شعله و ضخامت شعله [۶]..... ۵
- شکل ۱-۴ - ضخامت شعله و فاصله خاموشی برای مخلوط متان-هوا در فشار اتمسفر [۷]..... ۶
- شکل ۱-۵ - سرعت شعله پیش‌آمیخته آرام برای مخلوط هیدروژن-هوا برحسب نسبت هم‌ارزی [۹]..... ۷
- شکل ۱-۶ - سرعت شعله پیش‌آمیخته آرام برای مخلوط متان-هوا برحسب نسبت هم‌ارزی [۵]..... ۷
- شکل ۱-۷ - تغییرات سرعت شعله پیش‌آمیخته مخلوط استکومتریکی متان-هوا با فشار در $T_u = 16 - 27^\circ C$ [۷]..... ۹
- شکل ۱-۸ - شماتیک جبهه شعله و خطوط جریان سیال [۱۱]..... ۱۱
- شکل ۱-۹ - شماتیک ناپایداری نفوذی-حرارتی [۴]..... ۱۲
- شکل ۱-۱۰ - شماتیک ناپایداری نفوذی-حرارتی [۱۳]..... ۱۳
- شکل ۱-۱۱ - ناپایداری کلوین- هولمهولتز در اثر ماهیت لایه‌های برشی [۱۳]..... ۱۴
- شکل ۱-۱۲ - نمودار بورگی برای الگوهای احتراق [۱۲، ۱۵]..... ۱۶
- شکل ۱-۱۳ - شماتیک الگوهای امکان‌پذیر برای انتشار شعله پیش‌آمیخته در یک کانال [۱]..... ۱۸
- شکل ۲-۱ - تصویر انتشار شعله $CO - O_2$ در داخل یک لوله بسته [۱۸]..... ۲۱

- شکل ۲-۲- تصویر (a) گل لاله در اندازه واقعی (b) تصویر جبهه سالاماندر (c) تصویر جبهه ایس و ویلر [۱۹]..... ۲۲
- شکل ۲-۳- تصویر جبهه متان-هوا در زمان‌های مختلف در کانال بسته با مقطع مربعی [۱۹]..... ۲۳
- شکل ۲-۴- تصویر جبهه شعله مخلوط استوکیومتری متان-هوا ایس و ویلر [۱۸]..... ۲۳
- شکل ۲-۵- برهم‌کنش شوک ضعیف و جبهه شعله استوکیومتری بوتان-هوا در ۲.۵ ms بعد از برخورد [۲۳]..... ۲۴
- شکل ۲-۶- بردارهای سرعت میدان جریان اندازه‌گیری شده به روش LDV به همراه تصویر جبهه شعله [۲۵]..... ۲۵
- شکل ۲-۷- دو ساختار ممکن از برهم‌کنش جریان چرخشی و شعله [۲۶]..... ۲۶
- شکل ۲-۸- ابعاد مدل آزمایشگاهی [۴۳]..... ۳۰
- شکل ۲-۹- تصاویر شعله برای ابعاد A، B و C با نسبت‌های مختلف هیدروژن [۴۳]..... ۳۰
- شکل ۲-۱۰- تصویر انتشار شعله برای سطوح کانال با درصد تخلخل متفاوت [۴۷]..... ۳۳
- شکل ۳-۱- نمای واقعی مجموعه آزمایشگاهی..... ۳۸
- شکل ۳-۲- شماتیک مجموعه آزمایشگاهی (۱) جرقه‌زن (شمع) (۲) حسگر فشار (۳) ورودی و خروجی گاز (۴) مجموعه تهیه مخلوط پیش‌آمیخته و تزریق گاز (۵) دوربین سرعت بالا (۶) موانع..... ۳۹
- شکل ۳-۳- محفظه ساخته‌شده برای مخلوط کردن سوخت و هوا..... ۴۰
- شکل ۳-۴- دوربین سرعت بالا..... ۴۱
- شکل ۳-۵- ترانس جرقه‌زن به همراه شمع..... ۴۲
- شکل ۳-۶- شمع جرقه‌زن..... ۴۳
- شکل ۳-۷- مانع‌های متخلخل از جنس نیکل..... ۴۴
- شکل ۳-۸- نحوه قرارگیری مانع با ارتفاع ۳۰ mm در فاصله ۵ cm در داخل محفظه..... ۴۵

- شکل ۳-۹- نحوه قرارگیری مانع صلب از جنس چوب با ارتفاع ۲۰ mm در فاصله ۵ cm در داخل محفظه..... ۴۵
- شکل ۳-۱۰- نمای قرارگیری واشر سیلیکونی برای آب‌بندی محفظه..... ۴۶
- شکل ۴-۱- تصویر شعله مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا در محفظه بسته بدون حضور مانع ۵۲
- شکل ۴-۲- موقعیت جبهه و سرعت نوک شعله برحسب زمان ۵۳
- شکل ۴-۳- تغییرات فشار داخل محفظه بسته بدون حضور مانع برحسب زمان..... ۵۴
- شکل ۴-۴- تصویر شعله مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا در محفظه بسته با حضور مانع متخلخل و صلب (حالت ۱)..... ۵۶
- شکل ۴-۵- (a) موقعیت مکانی شعله و (b) تغییرات فشار داخل محفظه نسبت به زمان برای مانع متخلخل و صلب (حالت ۱)..... ۵۷
- شکل ۴-۶- تصویر شعله مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا در محفظه بسته با حضور مانع متخلخل و صلب (حالت ۲)..... ۵۹
- شکل ۴-۷- (a) موقعیت مکانی شعله و (b) تغییرات فشار داخل محفظه نسبت به زمان برای مانع متخلخل و صلب (حالت ۲)..... ۶۰
- شکل ۴-۸- تصویر شعله مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا در محفظه بسته با حضور مانع متخلخل و صلب (حالت ۳)..... ۶۲
- شکل ۴-۹- (a) موقعیت مکانی شعله و (b) تغییرات فشار در داخل محفظه نسبت به زمان برای مانع متخلخل و صلب (حالت ۳)..... ۶۳
- شکل ۴-۱۰- تصویر شعله مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا در محفظه بسته با حضور مانع متخلخل و صلب (حالت ۴)..... ۶۵
- شکل ۴-۱۱- (a) موقعیت مکانی شعله و (b) تغییرات فشار در داخل محفظه نسبت به زمان برای مانع متخلخل و صلب (حالت ۴)..... ۶۶

- شکل ۴-۱۲- تصویر شعله با حضور مانع متخلخل برای $h_{\text{Obst}} = 20 \text{ mm}, 25 \text{ mm}, 30 \text{ mm}$, ۳۵ mm (حالت ۱) ۶۷
- شکل ۴-۱۳- (a) موقعیت مکانی شعله و (b) تغییرات فشار با حضور مانع متخلخل با h_{Obst} متفاوت (حالت ۱) ۶۸
- شکل ۴-۱۴- تصویر شعله با حضور مانع متخلخل برای $h_{\text{Obst}} = 20 \text{ mm}, 25 \text{ mm}, 30 \text{ mm}$, ۳۵ mm (حالت ۲) ۶۹
- شکل ۴-۱۵- (a) موقعیت مکانی شعله و (b) تغییرات فشار با حضور مانع متخلخل با h_{Obst} متفاوت (حالت ۲) ۷۰
- شکل ۴-۱۶- تصویر شعله با حضور مانع متخلخل برای $h_{\text{Obst}} = 20 \text{ mm}, 25 \text{ mm}, 30 \text{ mm}$, ۳۵ mm (حالت ۳) ۷۱
- شکل ۴-۱۷- (a) موقعیت مکانی شعله و (b) تغییرات فشار با حضور مانع متخلخل با h_{Obst} متفاوت (حالت ۳) ۷۳
- شکل ۴-۱۸- تصویر شعله با حضور مانع متخلخل برای $h_{\text{Obst}} = 20 \text{ mm}, 25 \text{ mm}, 30 \text{ mm}, 35$ mm (حالت ۴) ۷۴
- شکل ۴-۱۹- (a) موقعیت مکانی شعله و (b) تغییرات فشار با حضور مانع متخلخل با h_{Obst} متفاوت (حالت ۱) ۷۵

فهرست جداول

- جدول ۴-۱- حالت‌های مختلف آزمایش شده ۵۰

فهرست علائم

علائم انگلیسی

A (Kg)	جرم هوا
h_{Obst} (mm)	ارتفاع مانع
c_p (j/KgK)	گرمای ویژه فشار ثابت
C (1)	کسر مولی
E	انرژی فعال سازی
F (Kg)	جرم سوخت
n (mol)	تعداد مول گاز
P (bar)	فشار
U_f (m/s)	سرعت شعله،

علائم یونانی

$\varphi = \frac{(F/A)_{act}}{(F/A)_{stoic}}$ (1)	نسبت هم‌ارزی
δ_L (m)	ضخامت شعله آرام
κ (w/mK)	هدایت حرارتی
ρ (Kg/m ³)	چگالی
σ (1)	شتاب بی‌بعد شعله
$\Theta = \rho_b/\rho_u$ (1)	نسبت چگالی مخلوط نسوخته به مخلوط سوخته

زیرنویس

act	حالت واقعی
i	گونه i ام

stoic

حالت استوکیومتری

T

مجموع گونه‌های مخلوط

u

مخلوط نسوخته

b

مخلوط سوخته

فصل ۱ - مقدمه

احتراق پیش آمیخته^۱ یک پدیده بسیار اساسی در احتراق است که می توان آن را به شعله های آرام^۲ و آشفته^۳ پیش آمیخته، بر اساس رژیم های احتراق طبقه بندی کرد. شعله بعد از اعمال جرقه^۴ آغاز و در مخلوط نسوخته منتشر می گردد و موجب تشکیل موج احتراق نیز می شود. اساساً این موج می تواند یک فرآیند با شتاب یا حتی انفجار را در شرایط مناسب ایجاد کند. با یک جرقه ضعیف شعله پیش آمیخته در یک لوله به طور معمول می تواند از حالت آرام به چین دار^۵ و به شعله آشفته و یا احتمالاً انفجار تبدیل شود.

۱-۲- شعله پیش آمیخته آرام

ساختار شعله و سرعت سوختن آرام دو پارامتر مهم و اساسی در انتشار شعله پیش آمیخته است. در بیشتر موارد واکنش های شیمیایی در محدوده نازک محلی شعله آرام رخ می دهند و حتی در احتراق آشفته نیز این چنین است. اثرات آشفتهگی به طور کلی ناشی از بهم ریختگی و چروک شدن جریان آشفته بر روی شعله آرام است. ساختار شعله و سرعت سوختن آرام به طور عمده توسط سینتیک شیمیایی، خواص ترموفیزیکی و خواص انتقالی، گونه های شیمیایی در داخل جبهه شعله تعیین می گردد. اکثر مطالعات اخیر از روش های عددی برای محاسبه ساختار و سرعت جبهه شعله استفاده کرده اند. در این روش ها معادلات حاکم که شامل بقای جرم، اندازه حرکت، انرژی و بقای گونه های شیمیایی است حل می شود.

¹ Premixed combustion

² Laminar flame

³ Turbulent flame

⁴ Ignition

⁵ Wrinkled

۱-۲-۱- ساختار شعله پیش آمیخته آرام

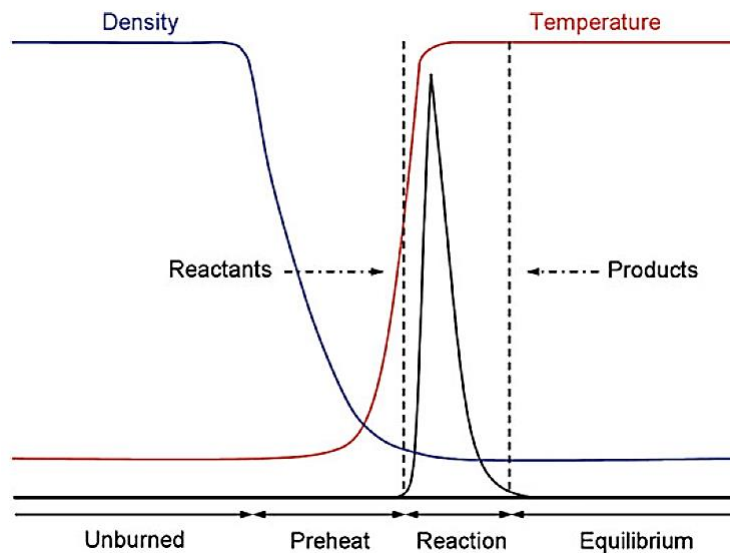
ساختار یک‌بعدی شعله پیش آمیخته در شکل ۱-۱ و شکل ۱-۲ آورده شده است. ساختار شعله را می‌توان به چهار قسمت تقسیم کرد:

(الف) ناحیه مخلوط نسوخته که شامل مخلوط سوخت-اکسید کننده سرد است. در این ناحیه پروفیل متغیرها بدون تغییرات است.

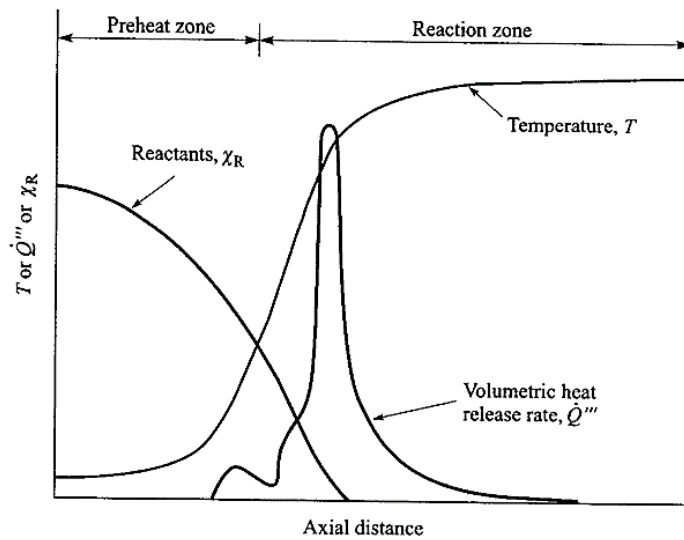
(ب) ناحیه پیش گرم، گرمای آزاد شده از واکنش‌های شیمیایی از طریق هدایت حرارتی از ناحیه جلویی منتقل شده و پیش گرم می‌شود. فرایند پیش گرم اثر مثبتی بر انجام واکنش‌های شیمیایی در مخلوط نسوخته دارد.

(ج) ناحیه واکنش، واکنش‌های شیمیایی در این ناحیه رخ داده و مخلوط مصرف شده، گرما و محصولات احتراق تولید می‌گردد. گرمای آزاد شده از واکنش‌ها دلیل اصلی انبساط محصولات احتراق است.

(د) ناحیه تعادل، ناحیه مخلوط سوخته شده و تمام متغیرها به حالت تعادل رسیده‌اند؛ و مشابه ناحیه مخلوط نسوخته پروفیل متغیرها بدون تغییر می‌باشند.



شکل ۱-۱- طرح ساده از ساختار جبهه شعله پیش آمیخته [۱]



شکل ۱-۲- ساختار جبهه شعله-پروفیل دما و نرخ تولید حرارت بر اساس نتایج آزمایشگاهی فریدمن و بورک^۱ [۲]

۱-۲-۲- ضخامت شعله پیش آمیخته آرام (δ_L)

ضخامت شعله^۲ آرام شامل ناحیه واکنش‌ها و پیش‌گرمایش است که در شکل ۱-۳ نشان داده شده

و به صورت تئوری از رابطه (۱-۱) قابل محاسبه است [۳-۵].

$$\delta_L = \frac{\kappa}{\rho_u c_p S_L} \quad (1-1)$$

که κ سرعت شعله آرام، گرمای ویژه فشار ثابت، چگالی و ضریب هدایت حرارتی مخلوط نسوخته است. این ضخامت تئوری از ضخامت واقعی شعله بسیار کوچک‌تر است، یک‌راه عملی‌تر برای محاسبه ضخامت شعله پیش آمیخته آرام بر اساس پروفیل دما است که به صورت رابطه (۲-۱) خواهد

بود:

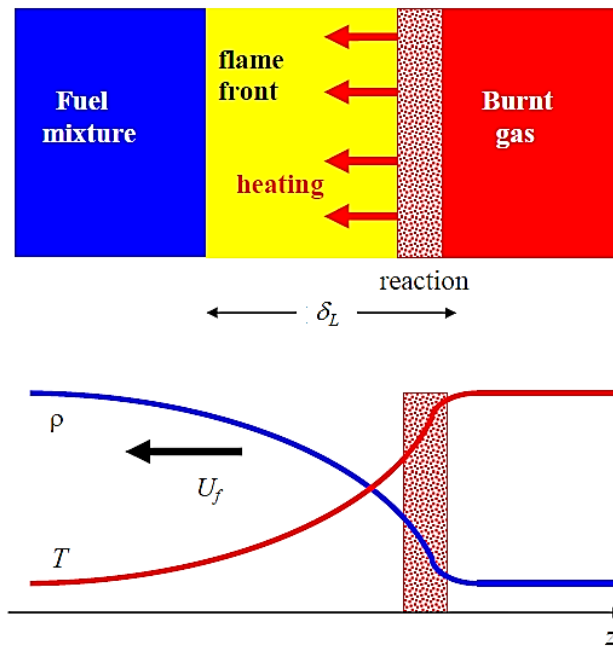
$$\delta_L = \frac{T_2 - T_1}{\max\left(\left|\frac{\partial T}{\partial x}\right|\right)} \quad (2-1)$$

اگر هدایت حرارتی از قانون ساتر لند محاسبه شود رابطه (۳-۱) خواهد شد:

$$\delta_L = \frac{2\kappa}{\rho_u c_p S_L} \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{0.7} \quad (3-1)$$

¹ Friedman and Burke

² Flame thickness

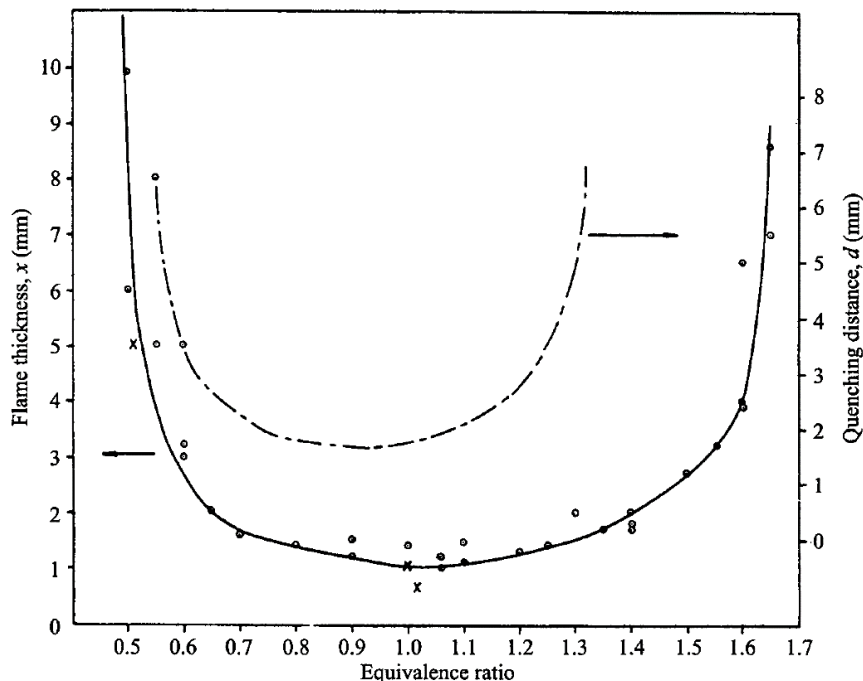


شکل ۱-۳- شماتیک جبهه شعله و ضخامت شعله [۶]

ضخامت شعله پیش آمیخته بسیار کوچک است و به طور کلی کسری از ۱ میلی متر است، به عنوان مثال برای مخلوط‌های هیدروژن-هوا با نسبت هم ارزی^۱ (φ) ۰.۷ و ۰.۴، در دما و فشار نرمال ضخامت شعله ۰.۳۵ و ۰.۴۳ میلی متر است [۱]. برای مخلوط شعله متان-هوا در فشار اتمسفر نمودار تغییرات ضخامت بر حسب نسبت هم ارزی و فاصله خاموشی^۲ در شکل ۱-۴ نشان داده شده است [۷]. پارامترهای مؤثر بر ضخامت شعله شامل ترکیب مخلوط و دما و فشار مخلوط می‌باشند.

¹ Equivalence ratio = $\frac{(F/A)_{act}}{(F/A)_{stoic}}$

² Quenching distance



شکل ۱-۴- ضخامت شعله و فاصله خاموشی برای مخلوط متان-هوا در فشار اتمسفر [۷]

۱-۲-۳- سرعت سوختن آرام در شعله پیش آمیخته

سرعت سوختن یک پارامتر حیاتی در احتراق و دینامیک شعله است. به ویژه در تحلیل‌های تئوری و عددی شبیه‌سازی دینامیک شعله سرعت سوختن بسیار مهم است. با کمک آنالیز ابعادی لاندل^۱ و لیفشیتز^۲ [۸] رابطه‌ای بین سرعت سوختن آرام، هدایت حرارتی و زمان واکنش‌های شیمیایی (τ) به صورت رابطه (۴-۱) به دست آورده‌اند:

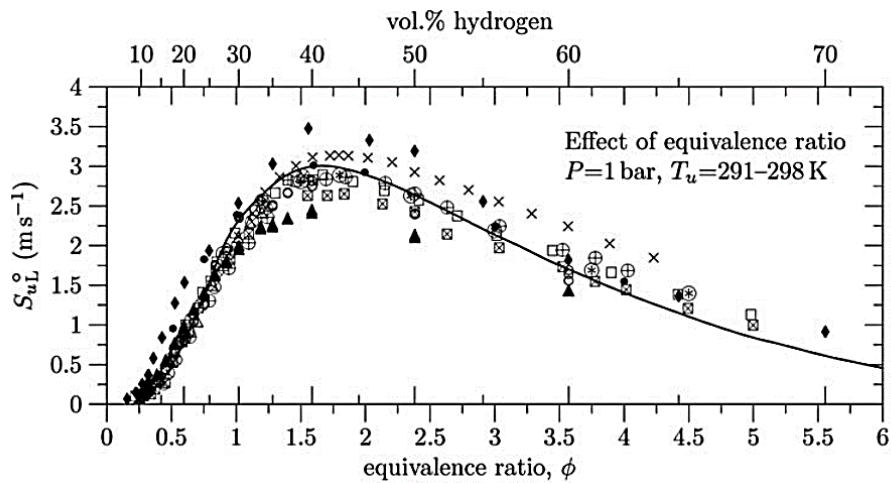
$$S_L \propto \sqrt{\frac{\kappa}{\rho_u c_p \tau}} \quad (۴-۱)$$

با استفاده از رابطه (۴-۱) بایچکوف^۳ و لیبرمن^۴ [۳] رابطه (۵-۱) را برای سرعت شعله آرام محاسبه کرده‌اند:

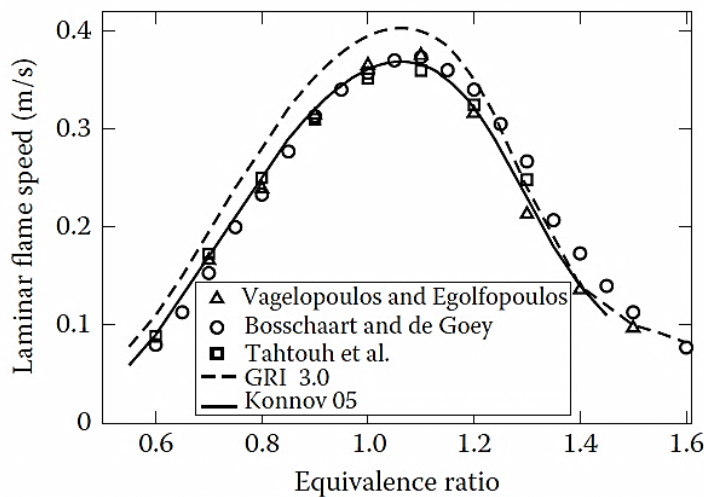
$$S_L \propto \sqrt{\frac{2\kappa}{\rho_u c_p \tau} \frac{\sqrt{\Theta} T_b}{\Theta - 1} \frac{T_b}{E} \exp\left(-\frac{E}{2T_b}\right)} \quad (۵-۱)$$

^۱ Landau
^۲ Lifshitz
^۳ Bychkov
^۴ Liberman

که $\Theta = \rho_u / \rho_b$ ضریب انبساط حجمی در واقع نسبت چگالی مخلوط نسوخته به سوخته است و T_b دمای مخلوط سوخته و E انرژی فعال سازی است. تحلیل های عددی و نتایج آزمایشگاهی بسیاری زیادی در مورد سرعت شعله انجام شده است. به عنوان مثال داهی^۱ [۹] بر اساس مراجع و نتایج مختلف نمودار تغییرات سرعت بر حسب نسبت هم ارزی را برای مخلوط هیدروژن-هوا در شکل ۱-۵ ارائه کرده است. همچنین برای مخلوط متان-هوا سرعت شعله در شکل ۱-۶ آورده شده است.



شکل ۱-۵- سرعت شعله پیش آمیخته آرام برای مخلوط هیدروژن-هوا بر حسب نسبت هم ارزی [۹]



شکل ۱-۶- سرعت شعله پیش آمیخته آرام برای مخلوط متان-هوا بر حسب نسبت هم ارزی [۵]

^۱ Dahoe

فشار و دمای مخلوط نسوخته اثرات قابل توجهی بر ساختار و سرعت سوختن شعله دارند. برای انتشار

شعله در مناطق محدودشده فشار و دمای مخلوط نسوخته در طی انتشار شعله به دلیل فشرده شدن

موجهای احتراق افزایش پیدا می‌کند. برای این حالت با فرض تراکم بی‌دررو رابطه (۶-۱) برای تغییرات

سرعت شعله برقرار است [۴]:

$$\frac{S_L}{S_{L0}} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^m \times \left(\frac{P}{P_0}\right)^n \quad (6-1)$$

که T و P فشار و دمای مخلوط نسوخته بعد از تراکم و اندیس صفر مربوط به شرایط استاندارد اولیه

است. برای مخلوط استوکیومتری متان-هوا $S_0 = 0.360 \text{ m/s}$ و مقدار $m = 1.612$, $n = -0.374$

توسط متقالچی و کک^۱ [۱۰] محاسبه شده است. همچنین با استفاده از فرض بی‌دررو^۲ بودن فرایند

احتراق و رابطه دما و فشار به صورت رابطه (۷-۱) خواهد شد:

$$\left(\frac{T}{T_0}\right) = \left(\frac{P}{P_0}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (7-1)$$

که در آن $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ نسبت گرمای ویژه است و رابطه تغییرات سرعت شعله برحسب فشار به صورت رابطه

(۸-۱) خواهد شد:

$$S_L = S_{L0} \times \left(\frac{P}{P_0}\right)^\varepsilon \quad (8-1)$$

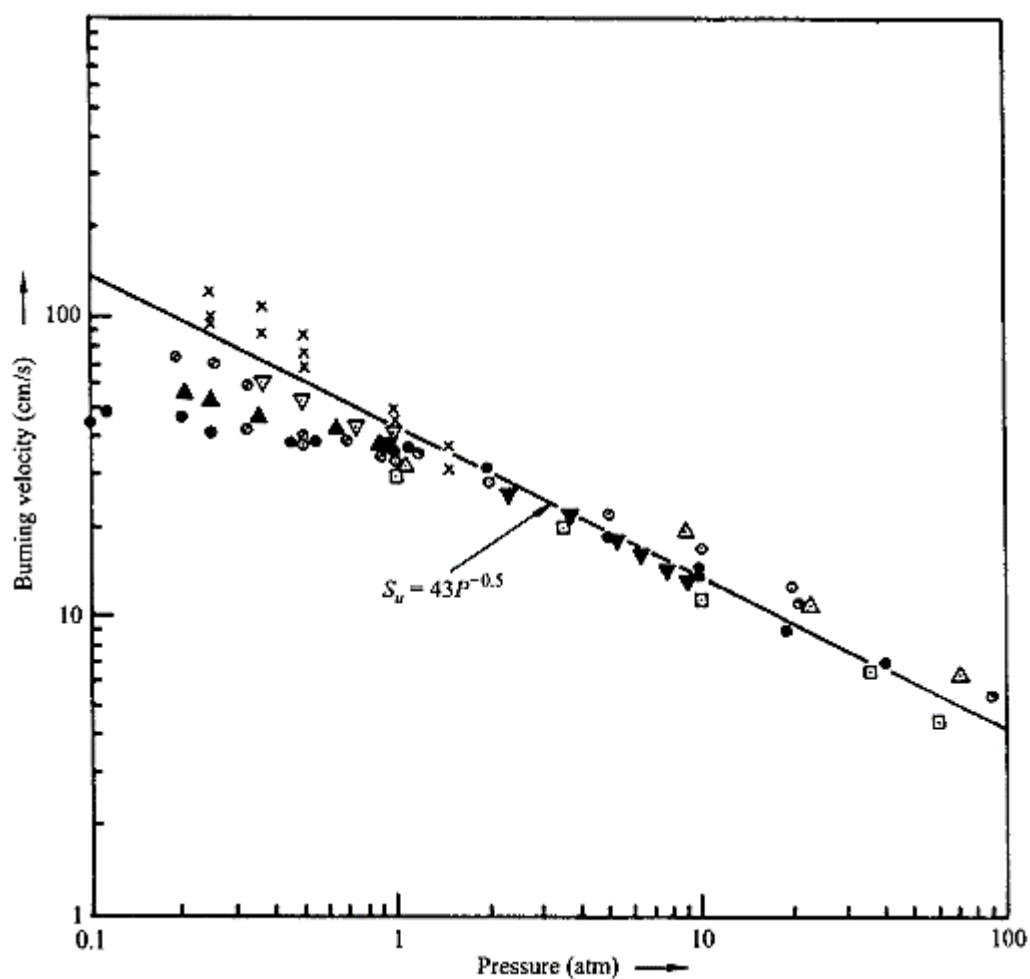
که ε شاخص سینتیک گرمایی^۳ است. برای مخلوط استکیومتری متان-هوا نمودار تغییرات سرعت

شعله برحسب فشار در شکل ۱-۷ آورده شده است.

¹ Keck

² Adiabatic

³ Overall thermokinetic index



شکل ۱-۷- تغییرات سرعت شعله پیش آمیخته مخلوط استکومتریک متان-هوا با فشار در $T_u = 16 - 27^\circ C$ [۷]

۱-۳- ناپایداری شعله^۱

عامل‌های بسیاری در انتشار شعله‌های پیش آمیخته تأثیر دارند، همچون موج‌های فشاری، اتلاف حرارتی، شرایط مرزی، موانع مسیر جریان و بسیاری دیگر. چندین نوع ناپایداری شعله در این مورد وجود دارد که شامل ناپایداری هیدرودینامیکی، ناپایداری پخشی-حرارتی، ناپایداری رایلی-تیلور^۲، ناپایداری کلون-هولمهلتز^۳ و ناپایداری گرانشی می‌شود [۱]. نمونه‌هایی از تأثیرات خارجی که ممکن است موجب ناپایداری شعله شوند، امواج صوتی، امواج ضربه‌ای و ایجاد الگوهای جریان در محفظه

^۱ Flame instabilities
^۲ Rayleigh- Taylor
^۳ Kelvin- Helmholtz

احتراق می باشد که شامل شرایط دینامیک سیال است. ناپایداری‌هایی که بدون اثرات خارجی در شعله رخ می‌دهند نتیجه عدم ثبات ذاتی واکنش‌دهنده‌ها است. نمونه‌هایی از این ناپایداری ذاتی عبارت‌اند از: ناپایداری سینتیک شیمیایی، پخش حرارتی^۱، داریوس-لاندا^۲ و بویانسی^۳.

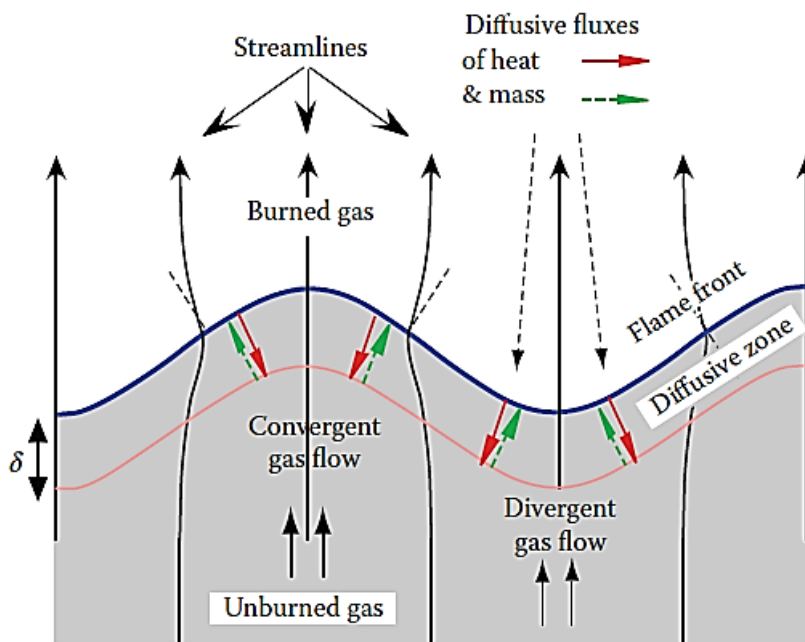
۱-۳-۱- ناپایداری لاندا-داریوس (هیدرودینامیکی)

ناپایداری هیدرودینامیکی توسط داریوس در سال ۱۹۳۸ و لاندا-لیفشیت در سال ۱۹۴۴ پیشنهاد شد. این دلیل نام این ناپایداری داریوس-لاندا (DL) نامیده می‌شود [۸]. این ناپایداری نتیجه انبساط گرمایی گاز در طی احتراق است. در این تئوری فرض شده الف) شعله به‌عنوان یک سطح غیر پیوسته بین دو میدان جریان غیر چسبنده تراکم‌ناپذیر است (ب) سرعت سوختن و نسبت تراکم‌پذیری (θ) ثابت هستند. پیوستگی جزء مماسی سرعت سیال بر روی جبهه شعله چین‌خورده در قسمتی که شعله به سمت مخلوط نسوخته محدب شده است، به این معنی است که خطوط جریان در داخل شعله واگرا و در قسمت مخلوط سوخته شده همگرا می‌گردد که این مطلب در شکل ۱-۸ نشان داده شده است. با توجه به پایستگی جرم با افزایش مساحت مقطع عرضی جریان و واگرا شدن خطوط جریان در جایی که جبهه شعله به داخل مخلوط نسوخته محدب شده است سرعت جریان سیال کاهش پیدا می‌کند. سرعت سیال در دو طرف جبهه شعله کاهش پیدا می‌کند اما سرعت سوختن ثابت باقی می‌ماند و قسمتی از شعله که به داخل مخلوط نسوخته محدب است بیشتر به سمت بالا دست حرکت می‌کند. این استدلال به‌طور عکس در قسمت مقعر جبهه شعله اعمال می‌شود و جبهه به سمت پایین دست حرکت می‌کند که اثر خالص این مکانیزم رشد آشفستگی است [۵]. ناپایداری داریوس-لاندا ممکن است بر اثر فرایند نفوذ در جبهه شعله پایدار شود. این ناپایداری همیشه در انتشار شعله پیش‌آمیخته در فضای محدودی که طول مشخصه آن به میزان قابل‌توجهی از ضخامت شعله بزرگ‌تر است حضور دارد [۱].

¹ Diffusive-Thermal

² Darrius-Landau

³ Buoyancy



شکل ۱-۸- شماتیک جبهه شعله و خطوط جریان سیال [۱۱]

۱-۳-۲- ناپایداری نفوذی-حرارتی

این ناپایداری همان‌طور که از اسم آن مشخص است، مکانیزم آن ناشی از هدایت حرارتی و نفوذ مولکولی واکنش‌دهنده‌ها است. این مکانیزم می‌تواند ناحیه واکنش را ناپایدار یا پایدار کند. پونست و وینان^۱ [۴] یک توصیف کیفی از این پدیده ناپایداری بر اساس عدد لوئیس^۲ ارائه کرده‌اند. عدد لوئیس به صورت رابطه (۹-۱) تعریف می‌گردد:

$$Le = \frac{\alpha}{D} = \frac{\kappa}{D\rho c_p} \quad (9-1)$$

که α و D ضریب پخش حرارتی^۳ و ضریب پخش جرم^۴ است. افزایش اتلاف حرارتی به مخلوط نسوخته گاز در قسمت‌هایی که شعله به صورت محدب به داخل مخلوط نسوخته شکل گرفته وجود دارد؛ اما اگر عدد لوئیس برابر یک باشد، مؤلفه‌های نفوذ حرارتی و مولکولی از شعله باهم برابر هستند، یعنی افزایش میزان اتلاف گرما در قسمت‌های محدب شعله با افزایش نرخ نفوذ واکنش‌دهنده‌ها به داخل شعله برابر

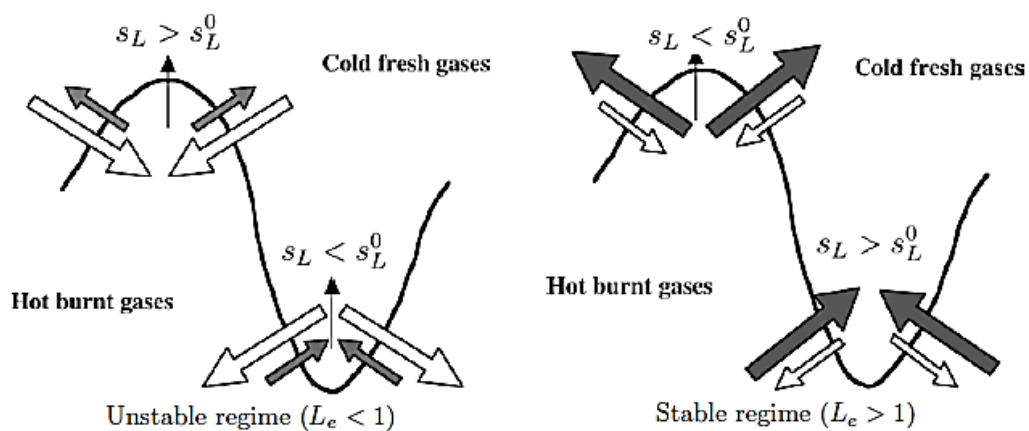
¹ Poinso and Veynante

² Lewis

³ Thermal diffusion

⁴ Mass diffusion

هستند. در نتیجه در این حالت درجه حرارت شعله و سرعت آن تغییر نمی‌کنند. اگر عدد لوئیس بزرگ‌تر از یک باشد، یعنی نفوذ ملکولی ضعیف باشد، گرمای ایجادشده از نفوذ واکنش‌دهنده‌ها کمتر از اتلاف گرما به کمک هدایت خواهد بود. در نتیجه دمای شعله و سرعت آن کاهش پیدا خواهد کرد و بنابراین ناپایداری کاهش پیدا خواهد کرد. برعکس اگر عدد لوئیس کوچک‌تر از یک باشد نفوذ واکنش‌دهنده‌ها قوی‌تر بوده و حرارت تولیدی از نفوذ واکنش‌دهنده‌ها بزرگ‌تر از اتلاف حرارتی به وسیله هدایت خواهد بود. در نتیجه در این حالت دمای شعله و سرعت سوختن افزایش پیدا می‌کنند، بنابراین ناپایداری تشدید و رشد پیدا می‌کند. بر اساس این توصیف، به‌طور کلی می‌توان گفت که یک شعله مسطح با $Le < 1$ به دلیل ناپایداری نفوذی-حرارتی ناپایدار است و پایدار است اگر $Le > 1$ است. شمایک این ناپایداری در شکل ۱-۹ آورده شده است.

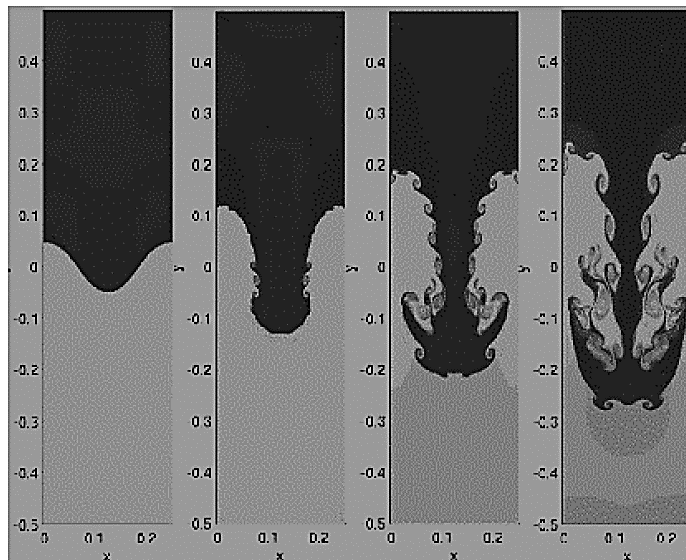


شکل ۱-۹- شماتیک ناپایداری نفوذی-حرارتی [۴]

۱-۳-۳- ناپایداری رایلی-تیلور

رایلی پایداری مایعات را در میدان گرانش مطالعه کرده و تیلور این مسئله را برای شتاب سیالات بررسی کرد. این ناپایداری بیان می‌کند که اگر دو سیال با چگالی متفاوت در مجاورت هم شتابدار باشند و سیال سبک‌تر به سیال سنگین‌تر شتاب بدهد در واقع سیال سبک‌تر به سیال سنگین‌تر نیرو وارد کرده و در این فرآیند سطح اشتراک دو سیال ناپایدار می‌گردد [۱۲]. این ناپایداری در شکل ۱-

۱۰ نشان داده شده است که سیال سبک‌تر در بالا به سیال سنگین‌تر که در پایین واقع شده نیرو وارد کرده و موجب ناپایداری شده است. در احتراق این ناپایداری زمانی که محصولات احتراق که سبک‌تر از واکنش‌دهنده‌ها بوده و به آن‌ها شتاب می‌دهند می‌تواند رخ بدهد [۱۳].



شکل ۱-۱۰- شماتیک ناپایداری نفوذی-حرارتی [۱۳]

۱-۳-۴- ناپایداری کلوین-هلمهولتز

نظریه این ناپایداری ابتدا توسط هلمهولتز و کلوین توسعه یافت. ناپایداری موردنظر 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 [۱۲]. تولید موج بر روی آب به دلیل جریان باد یک مثال کلاسیک از این ناپایداری است [۱۳]. یک نمونه از این ناپایداری در شکل ۱-۱۱ نشان داده شده است. ژدانوف^۱ [۱۴] حالتی را توصیف می‌کند که سطح مشترک دو سیال با چگالی متفاوت تحت تأثیر دو ناپایداری کلوین-هلمهولتز و رایلی-تیلور قرار می‌گیرد. این وضعیت زمانی اتفاق می‌افتد که سیال سنگین‌تر بر روی سیال سبک‌تر

^۱ Zhdanov

قرار دارد. سیال سبک‌تر به دلیل نیروی شناوری به سطح مشترک دو سیال از سیال سبک به طرف سیال سنگین نیرو وارد می‌کند. این فرایند سطح مشترک دو سیال را بر اساس ناپایداری رایلی-تیلور ناپایدار کرده و سیال سبک به صورت انگشتی به داخل سیال سنگین تر نفوذ می‌کند؛ اما سطح مشترک بین دو سیال بر اثر رشد نفوذ انگشتی بر اساس ناپایداری کلوین-هولمهولتز ناپایدار می‌گردد، زیرا سرعت دو سیال متفاوت است. استدلال مشابه برای انتشار شعله مسطح پیش آمیخته در داخل یک کانال می‌تواند صادق باشد. انبساط محصولات احتراق شعله را بر اساس ناپایداری رایلی-تیلور ناپایدار کرده و ناپایداری کلوین-هولمهولتز رشد انگشتی شعله را ناپایدار می‌کند؛ اما رشد حالت انگشتی شعله در داخل یک لوله افقی ناحیه گاز نسوخته‌ای در بالای مخلوط سوخته ایجاد می‌کند؛ بنابراین ناپایداری کلوین-هولمهولتز ممکن است توسط ناپایداری رایلی-تیلور تقویت و یا تضعیف شود [۱۲].



شکل ۱-۱۱- ناپایداری کلوین-هولمهولتز در اثر ماهیت لایه‌های برشی [۱۳]

۱-۴- شعله پیش آمیخته آشفته

یک شعله آرام که بعد از یک جرقه ضعیف شکل می‌گیرد به موجب ناپایداری‌های هیدرودینامیکی و احتراق به هم‌ریخته می‌شود. شعله به هم‌ریخته شده یا اصطلاحاً چروک شده به شعله سلولی تبدیل شده و در نهایت می‌تواند موجب احتراق آشفته گردد. علاوه بر این شعله آشفته می‌تواند از برهم‌کنش 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 پس‌زمینه ساکن داشته باشد، آشفته‌گی بر اثر ناپایداری‌های شعله و اثرات لایه‌مرزی خواهد بود. یکی از اثرات اصلی آشفته‌گی در احتراق پیش‌آمیخته این است که آشفته‌گی تا حد زیادی می‌تواند سرعت سوختن را افزایش دهد و افزایش سرعت شعله به علت آشفته‌گی به شدت به میزان آشفته‌گی یا سرعت نوسان آشفته ارتباط دارد [۴]. تعامل عمده بین شعله و آشفته‌گی به‌طور 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 آرام ($\tau_L = \frac{\delta_L}{S_L}$) تعریف شود. جریان‌های آشفته را می‌توان به‌عنوان یک سلسله از گردابه‌های در طیف گسترده از طول و زمان مشخصه مشاهده کرد که طول مشخصه و موقعیت محور این گردابه‌ها تصادفی است. مقیاس انتگرال جریان آشفته l_0 می‌توان به‌عنوان بزرگ‌ترین مقیاس طولی گردابه تعریف کرد. این مقیاس به‌طور معمول کوچک‌تر از مقیاس مشخصه در حوزه فیزیکی مانند قطر در یک لوله، در نظر گرفته می‌شود و مقیاس زمانی مربوط τ_0 است. گردابه‌های بزرگ به گردابه‌های کوچک‌تر شکسته می‌شوند و این فرآیند ادامه دارد که گردابه‌های کوچک‌تر و کوچک‌تر ایجاد می‌گردند و این سلسله تولید گردابه ادامه دارد تا جایی که نفوذ مولکولی اهمیت پیدا کرده و اتلاف ویسکوز اتفاق بیفتد. مقیاس طولی که در آن اتلاف ویسکوز رخ بدهد را به‌عنوان کوچک‌ترین مقیاس جریان آشفته در نظر می‌گیرند. این مقیاس معمولاً با مقیاس طولی کلموگوروف l_k ^۲ و مقیاس زمانی مربوطه را با τ_k مقیاس زمانی کلموگوروف می‌دهند [۱]. اثرات آشفته‌گی در احتراق پیش‌آمیخته را می‌توان با استفاده از دیاگرام بورگی^۳ توصیف کرد. دیاگرام در شکل ۱-۱۲ نشان داده شده است. محور عمودی سرعت بی‌بعد شده \tilde{u}/S_L است که نسبت سرعت نوسانی آشفته به سرعت شعله آرام است. محور افقی نیز مقیاس طولی بی‌بعد شده l_0/δ_L

¹ Vortex

² Kolmogorov

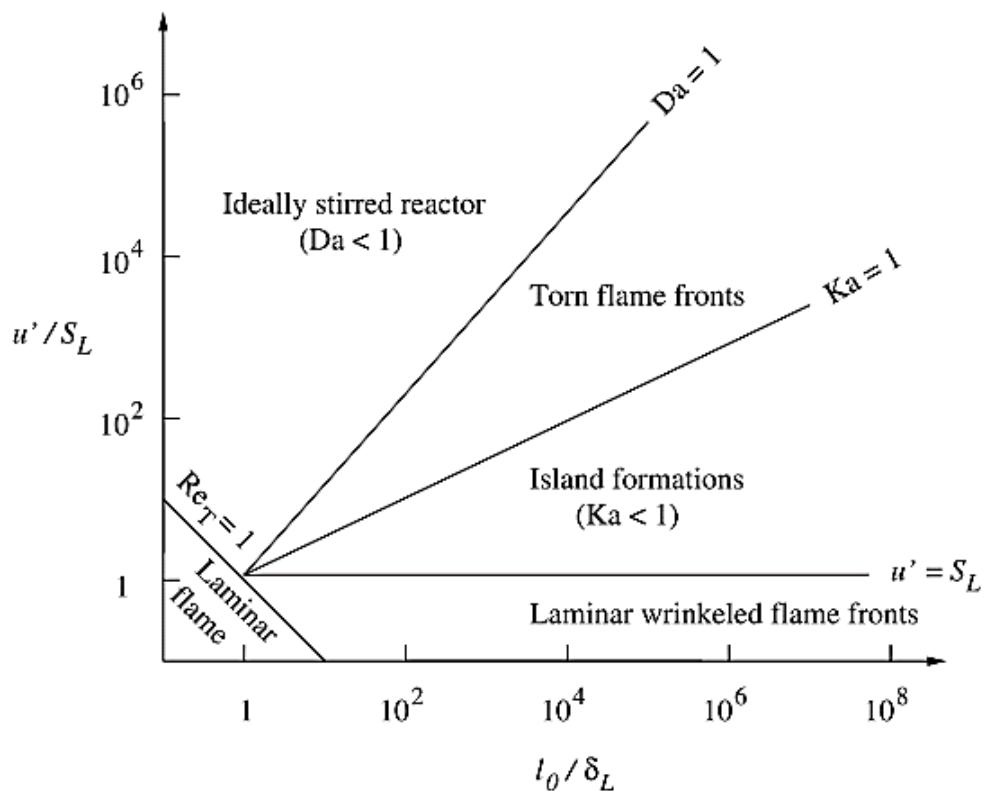
³ Borghi

است که نسبت مقیاس انتگرالی آشفته به ضخامت شعله آرام است. همچنین از عددهای بی بعد رینولدز آشفته R_T ، کارلوویتز Ka^1 و دامخولر Da^2 استفاده شده است که به صورت روابط زیر تعریف می‌شوند [۴،۵]:

$$R_T = [\rho \bar{u} l_0 / \mu]^2 \quad (10-1)$$

$$K_a = \tau_L / \tau_k \quad (11-1)$$

$$D_a = \tau_0 / \tau_L \quad (12-1)$$



شکل ۱-۱۲- نمودار بورگی برای الگوهای احتراق [۱۲،۱۵]

خط $R_T = 1$ احتراق را به منطقه آرام و آشفته تقسیم کرده است. در منطقه‌ای که $\bar{u} < S_L$ سرعت نوسانی کوچک‌تر از سرعت شعله است، پیشرفت آشفته‌گی آهسته‌تر از شعله بوده و تنها می‌تواند جبهه شعله را چین‌دار کند. اگر $K_a < 1$ & $\bar{u} > S_L$ ضخامت شعله کوچک‌تر از مقیاس طولی کلموگروو

¹ Karlovitz

² Damkohler

گردابه باشد، شدت آشفته‌گی بزرگ‌تر از سرعت شعله آرام است. چین و چروک‌های شعله در این نوع آشفته‌گی باعث ایجاد تکه‌های جزیره‌ای شکل از مخلوط سوخته و نسوخته گاز می‌شود. پیتتر^۱ [۱۶] این ناحیه را به‌عنوان ناحیه شعله‌وری چین‌دار^۲ معرفی کرد. اگر $K_a > 1$ & $D_a > 1$ مقیاس طولی کلموگروو، گردابه‌ها کوچک‌تر از ضخامت شعله است. در این حالت شعله آرام نمی‌تواند پایدار باشد چون کوچک‌ترین گردابه‌ها ساختار داخلی شعله را تغییر می‌دهند. پدیده خاموشی محلی شعله وقتی که گردابه‌ها شعله را به‌شدت می‌کشند رخ می‌دهد. این ناحیه شعله تورن^۳ یا ناحیه واکنش توزیع‌شده^۴ نامیده می‌شود. در ناحیه آخر $D_a < 1$ سرعت واکنش‌های شیمیایی در مقابل سرعت آشفته‌گی آهسته‌تر است. هر گردابه بزرگی می‌تواند در ناحیه واکنش‌ها با سرعتی بیشتر از سرعت جبهه شعله آرام وارد شود. این حالت احتراق غیرواقعی است [۱].

۱-۵- الگوهای احتراق در انتشار شعله داخل یک کانال

همان‌طور که در شکل ۱-۱۳ نشان داده‌شده، الگوی جریان احتراق به پنج مرحله یا الگوی متمایز تقسیم می‌گردد که شامل: (۱) جرقه ضعیف (۲) شعله آرام (۳) شعله آرام چین‌دار (۴) شعله آشفته (۵) شبه تراک/تراک^۵. فرآیند به این صورت است که ابتدا با ایجاد یک جرقه ضعیف شعله آرام با سطحی هموار شکل می‌گیرد در این مرحله تغییرات شعله تابع سرعت شعله آرام و نسبت انبساط است. با انتشار شعله سطح آن نیز به‌سرعت افزایش می‌یابد. شعله در واقع یک ناپیوستگی در چگالی و به‌طور ذاتی مستعد به ناپایداری است. در طی توسعه شعله و وجود ناپایداری‌ها، چین چروک در جبهه شعله ایجادشده که باعث افزایش سطح شعله و در نتیجه تسریع سرعت سوختن می‌گردد. شتاب شعله بیشتر به‌واسطه آشفته‌گی رخ داده و رشد می‌کند. آشفته‌گی به‌وسیله اثرات دیواره، ناپایداری‌های شعله و برهم‌کنش

¹ Peter

² Wrinkled flamelet zone

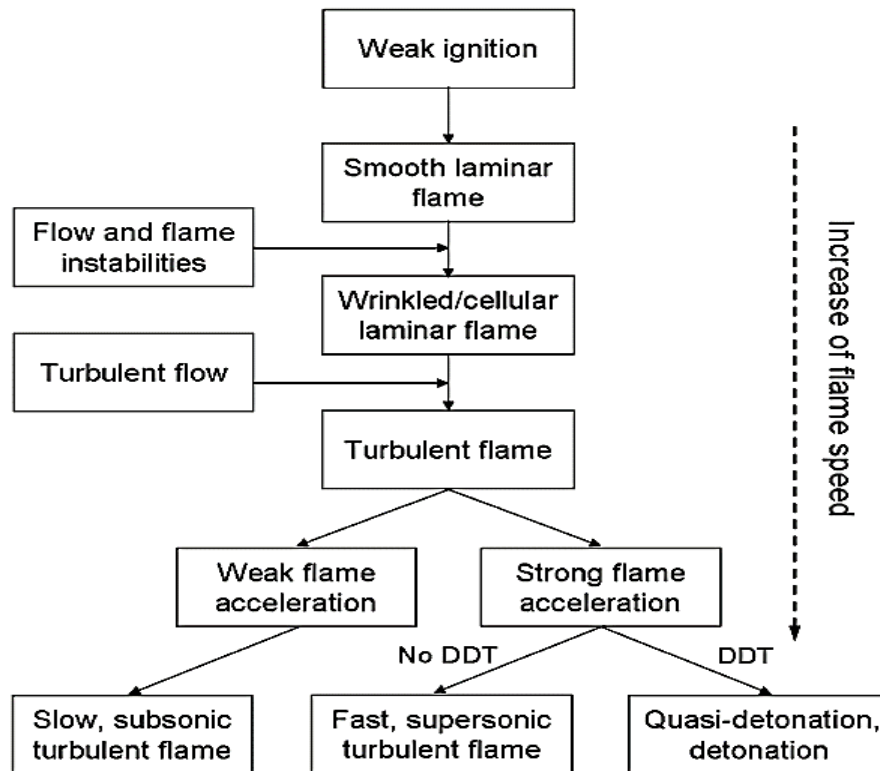
³ Torn or distributed reaction zone

⁴ Distributed reaction zone

⁵ Detonation

موج‌های فشاری و شعله می‌تواند ایجاد شود. اثرات دیواره شامل جریان برشی، اثرات زبری مرز و آشفتگی

جریان به دلیل شکل نامنظم دیوار است [۱].



شکل ۱-۱۳- شماتیک الگوهای امکان‌پذیر برای انتشار شعله پیش آمیخته در یک کانال [۱]

۱-۶- جمع‌بندی

فرآیند انتشار شعله متأثر از پارامترهای متعددی همچون: دمای مخلوط، نسبت هم‌ارزی، ماهیت شیمیایی گاز، الگوی جریان حاکم، شرایط مرزی و ...؛ که موجب ایجاد ناپایداری‌ها و تغییر در مکانیزم انتشار شعله می‌گردند. در این تحقیق به‌طور خاص اثر موانع متخلخل بر الگوی انتشار جبهه شعله استوکیومتری متان-هوا در یک محیط بسته مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است.

فصل ۲- پیشینه تحقیق

تاریخچه‌ی تحقیق در مورد انتشار شعله‌های پیش آمیخته در مخازن بسته به‌عنوان یک پیش‌زمینه تحقیق به اواخر سال ۱۸۰۰، زمانی که مالارد و لوشاتلیه^۱ [۱۷] رفتار انفجار در تونل‌های معادن زغال‌سنگ را بررسی می‌کردند بازمی‌گردد. در دهه‌های اولیه قرن ۲۰ آزمایش‌کنندگان از دوربین‌های نواری جهت عکس‌برداری از انتشار جبهه شعله پیش آمیخته استفاده می‌کرده‌اند که البته جزئیاتی در مورد شکل شعله ثبت نمی‌شده است. علاقه شدید به اندازه‌گیری سرعت‌های شعله به‌صورت تصویری و مشاهده گذر از احتراق به انفجار، پیشرفت‌هایی را در زمینه تکنیک‌های عکس‌برداری ایجاد کرد که امکان تصویربرداری از شکل شعله در طی احتراق را فراهم نمود. به‌عنوان مثال ماسون و ویلر^۲ یک تصویر لحظه‌ای از انتشار شعله در داخل یک لوله ارائه کردند و نشان دادند که جبهه شعله نامتقارن است و بیان می‌کنند که این پدیده ماهیت پیچیده‌ای دارد. قابل توجه‌ترین تحقیق‌ها به کمک عکس‌برداری از شعله در مخازن بسته توسط الیس^۳ که با ارائه یک تکنیک جدید که از یک دوربین باقابلیت چرخش استفاده کرده انجام شده است. با استفاده از این دوربین او تصاویر انتشار شعله $CO - O_2$ برای هندسه‌های مختلف را ارائه کرد که یک نمونه بسیار جالب آن مربوط به سال ۱۹۲۸ توسط الیس و ویلر [۱۸] برای لوله‌ای با قطر ۲.۵ سانتیمتر و طول ۲۰.۳ سانتیمتر است که در شکل ۲-۱ آورده شده و به‌عنوان شعله‌ی گل لاله^۴ معروف شده، هرچند الیس هرگز به این نام اشاره نکرده است [۱۹] و در سال ۱۹۵۹ توسط سالاماندر^۵ و همکاران [۲۰] شعله گل لاله نام‌گذاری شده است. در این شکل دیده می‌شود که شعله ابتدا به‌صورت نیم‌کره به‌طور متقارن از محل جرقه که ابتدای لوله قرار دارد رشد می‌کند و به شکل گنبدی شکل درآمده که این حالت توسط کلنت و سیربی^۶ [۲۱] تشبیه به انگشت^۷ شده است. در ادامه

¹ Mallard and Le Chatelier

² Mason and Wheeler

³ Ellis

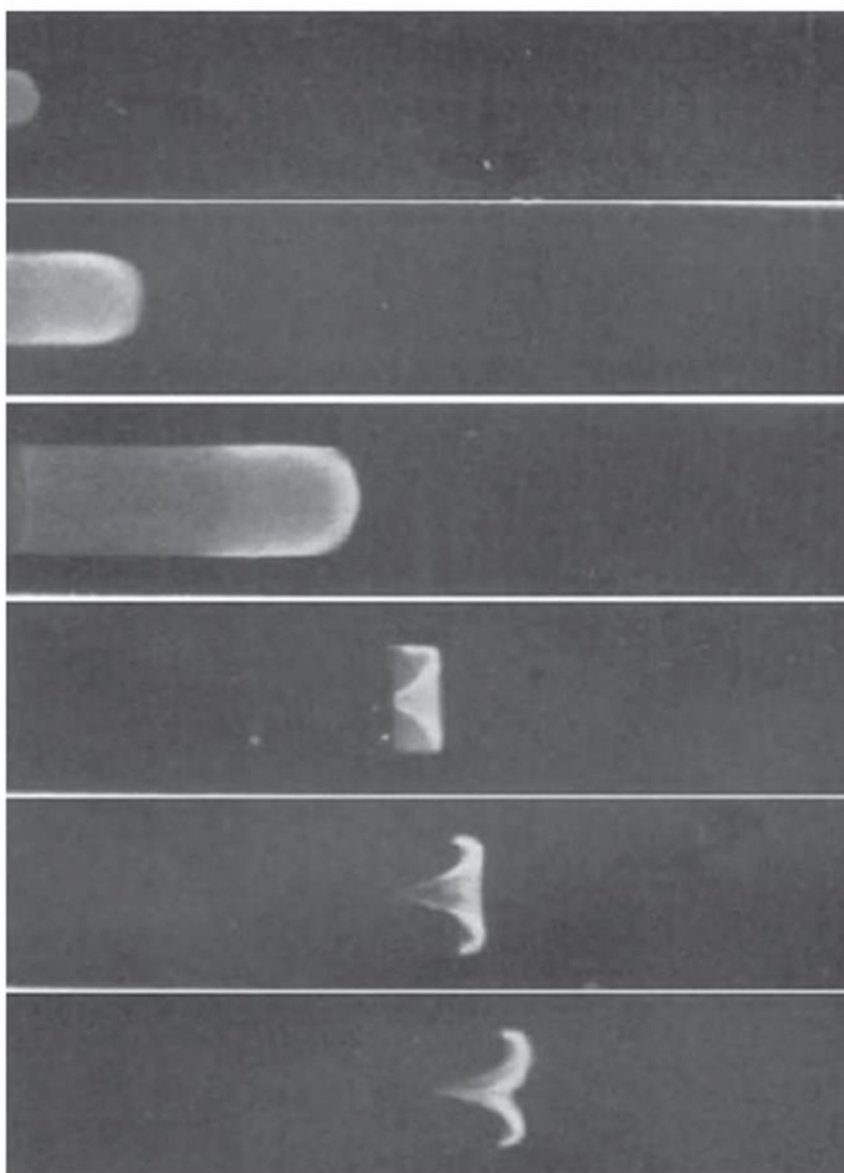
⁴ Tulip flame

⁵ Salamandra

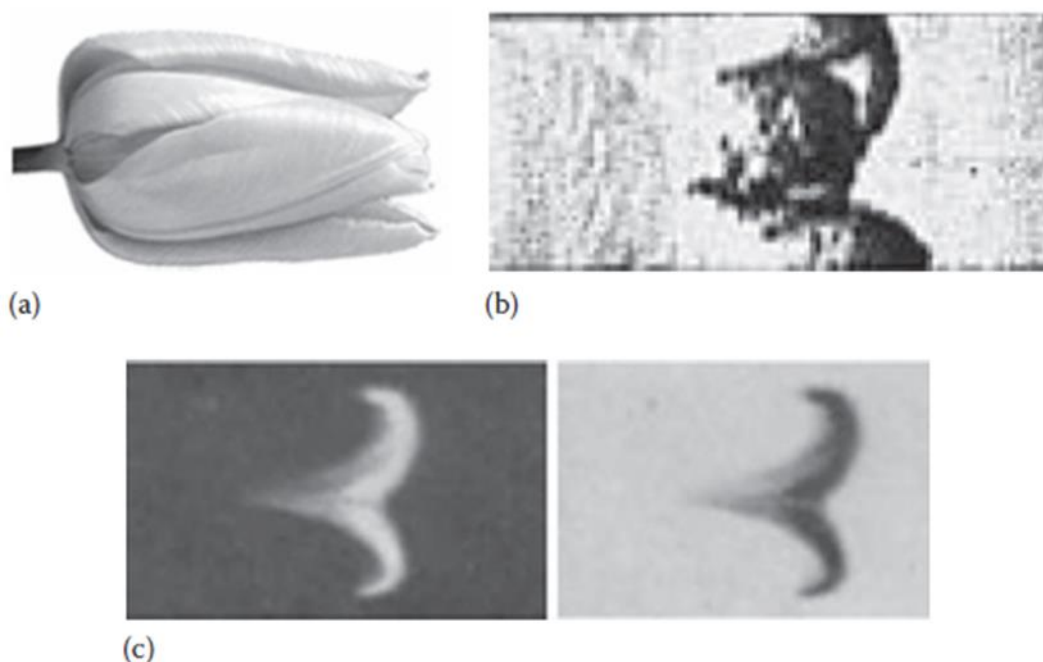
⁶ Clanet and Searby

⁷ Finger

نیز شعله به صورت تخت و بعد از آن به شکل هلالی شکل (گل لاله) تبدیل خواهد شد. در شکل ۲-۲ تصویر گل لاله در اندازه واقعی آن به همراه تصویر جبهه که توسط الیس و ویلر و تصویری که توسط سالاماندر و همکاران تهیه شده نمایش داده شده است [۱۹].



شکل ۲-۱- تصویر انتشار شعله $\text{CO} - \text{O}_2$ در داخل یک لوله بسته [۱۸]



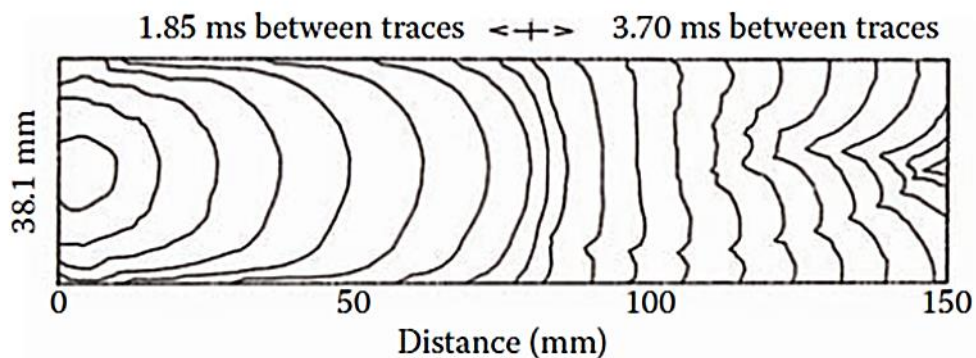
شکل ۲-۲- تصویر (a) گل لاله در اندازه واقعی (b) تصویر جبهه سالامندرا (c) تصویر جبهه ایس و ویلر [۱۹]

یک نمونه نمایش دیگر از این تغییرات جبهه که حالت‌های مختلف آن در یک تصویر نشان داده شده در شکل ۲-۳ آورده شده که مقطع کانال مربع به ضلع 38.1 mm و طول آن 150 mm است، مخلوط گازی مربوط به آن متان-هوا با نسبت هم ارزی یک بوده و سرعت دوربین 5000 frames/s و تکنیک عکس برداری شلیرن^۱ استفاده شده، است.

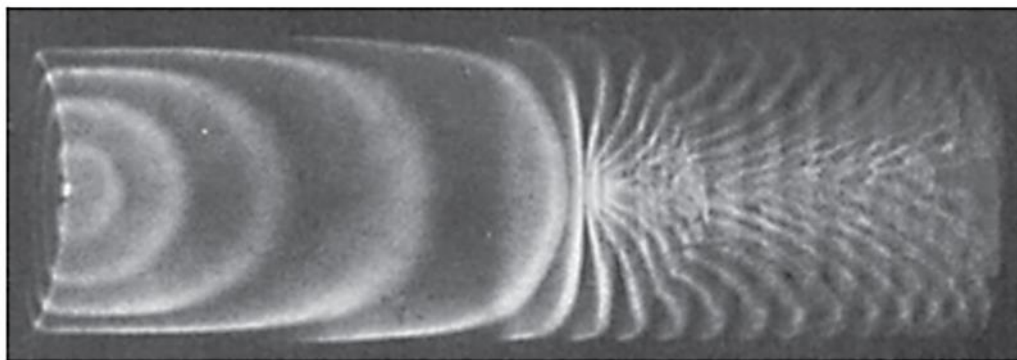
برای اینکه این پدیده گل لاله در شعله رخ بدهد باید دو انتهای کانال بسته بوده و نسبت هم ارزی مخلوط نزدیک به حالت استوکیومتری باشد همچنین ابعاد کانال باید دارای نسبت طول به عرض در حدود ۴ تا ۲۰ بوده و عرض کانال به اندازه کافی بزرگ باشد ($25 \text{ mm} <$) تا مانع از تأثیر انتقال حرارت و اثر لایه مرزی شود و به اندازه کافی کوچک باشد ($100 \text{ mm} >$) تا از اعوجاج‌های ناشی از نیروی شناوری و به هم ریختگی جبهه شعله جلوگیری شود، با این حال خارج از این حدود این پدیده رخ می‌دهد ولی دارای وضوح کافی نیست. یک نمونه‌ی شکل جبهه شعله از کار ایس و ویلر در شکل ۲-۴ نشان

^۱ schlieren

داده شده که از نور حاصل خود شعله در عکس برداری استفاده شده است. مخلوط استوکیومتری متان- هوا و قطر لوله ۲.۵ cm و طول ۲۰.۳ cm است که در آن مراحل رشد شعله به وضوح دیده می شود.

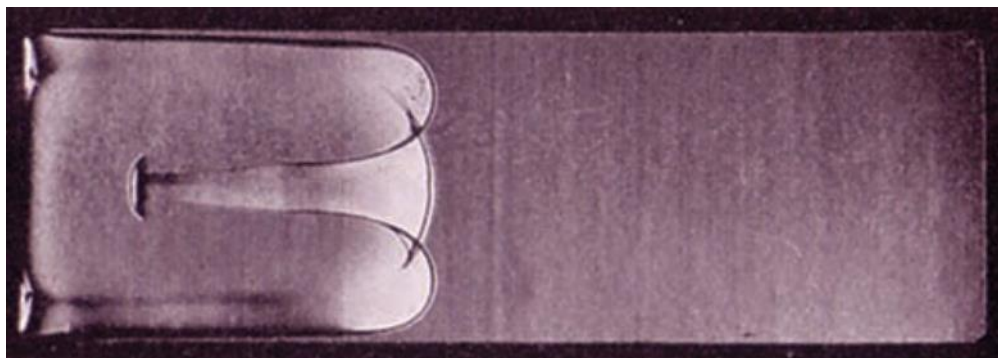


شکل ۲-۳- تصویر جبهه متان-هوا در زمان های مختلف در کانال بسته با مقطع مربعی [۱۹].



شکل ۲-۴- تصویر جبهه شعله مخلوط استوکیومتری متان-هوا الیس و ویلر [۱۸]

تلاش های اولیه برای توضیح پدیده گل لاله، تمرکز بر روی تعامل های موج فشاری و شعله بوده است. تصویر ارائه شده توسط مارکستین [۲۲] که در شکل ۲-۵ نشان می دهد که وقتی یک شوک ضعیف با نسبت فشاری ۱.۱ از سمت راست با جبهه شعله برهم کنش دارد، چگونه موج های فشاری جبهه شعله را دچار بهم ریختگی می کند.



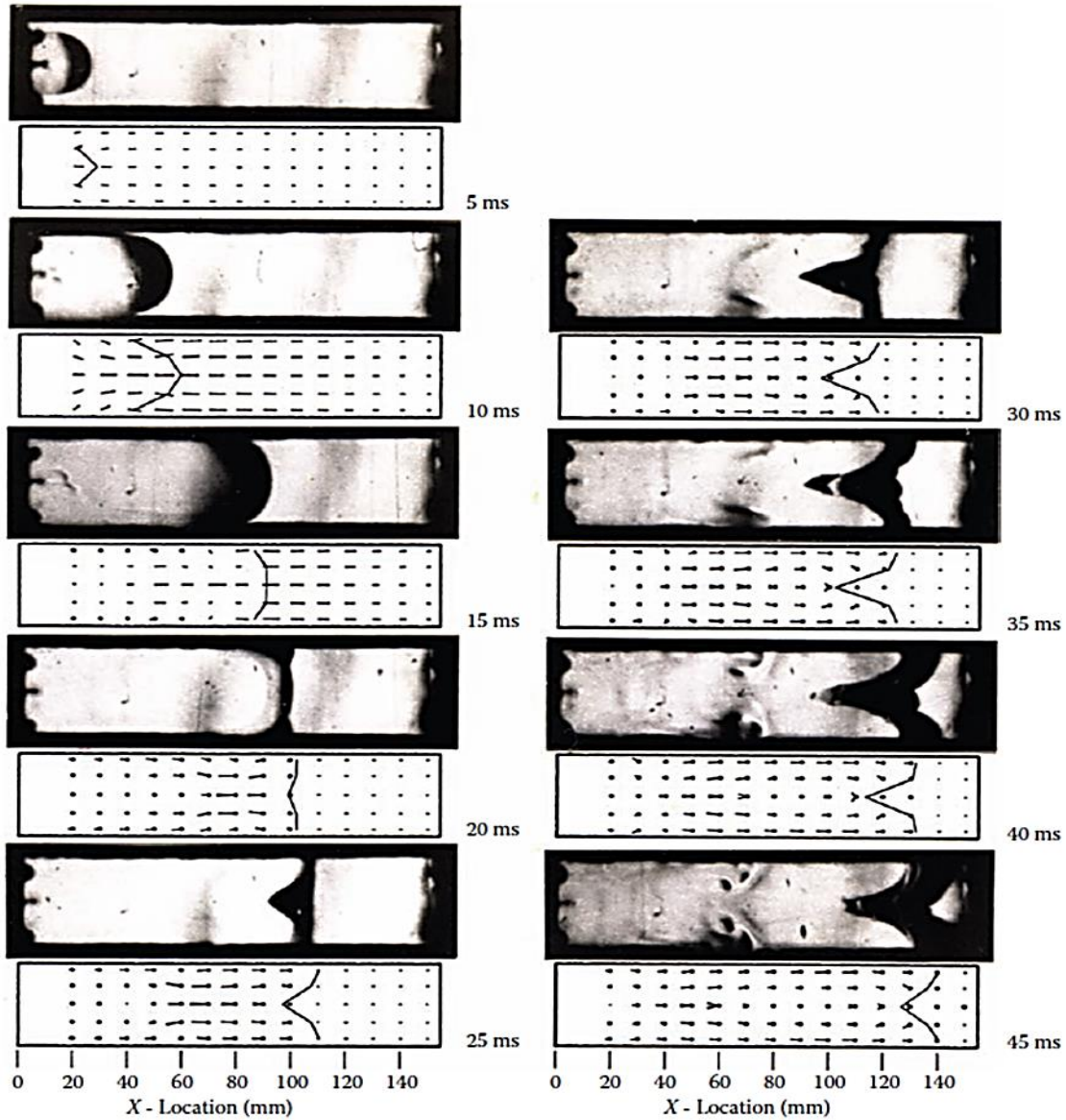
شکل ۲-۵- برهم‌کنش شوک ضعیف و جبهه شعله استوکیومتری بوتان-هوا در ۲.۵ ms بعد از برخورد [۲۳]

با این حال، مطالعات عددی نشان داده که شعله گل لاله حتی زمانی که موج‌های فشاری وجود ندارند رخ می‌دهد [۲۴] و به نظر می‌آید که برهم‌کنش جریان و شعله ممکن است مهم باشد. با ظهور سرعت‌سنج دوپلر لیزری^۱ یک روش ارائه شد که این تعامل بین جریان و شعله را می‌توان کمی مشاهده کرد. شکل ۲-۶ یک نمونه از این نتایج اندازه‌گیری سرعت که توسط دان رانکین^۲ [۲۵] انجام شده است را برای کانال با مقطع مربعی به ضلع ۳۸.۱ mm و طول ۱۵۰ mm نشان می‌دهد. در این تصویر با ردیابی میدان سرعت در موقعیت‌هایی که جبهه شعله قرار دارد، گردابه‌ای که ایجاد شده موجب تغییر شکل شعله می‌شود و این به وضوح در بردارهای سرعت دیده می‌شود. اندازه‌گیری سرعت به‌طور واضح نشان داده که پدیده شعله گل لاله بر اساس جریان برگشتی قابل توجهی در مخلوط نسوخته یا هر برخورد جریان در طول دیواره‌ها نیست. در واقع گاز نسوخته رفتار ساده‌ای همچون یک پیستون فشرده کننده که ناشی دارد عمل می‌کند. اندازه‌گیری‌ها نیز نشان داد که اثرات لایه مرزی در لوله‌های با قطرهای نسبتاً بزرگ قابل توجه نیست. نتایج قابل توجه دیگر از اندازه‌گیری‌های سرعت در گاز سوخته تخت شدن جبهه شعله که در ابتدا محدب است. شعله منحنی تولید جریان چرخشی قابل توجهی در مخلوط سوخته می‌کند که این چرخش در اثر انبساط طبیعی ایجاد شده و سطح شعله را به سمت بالای خط مرکزی منحرف می‌کند. در طی مراحل اولیه رشد جبهه شعله این چرخش تأثیر چندانی بر شعله نمی‌گذارد زیرا گسترش شعله به سرعت به سمت پایین دست رشد می‌کند، اما همان‌طور که دامنه شعله به دیواره‌ها

^۱ Laser Doppler Velocimetry (LDV)

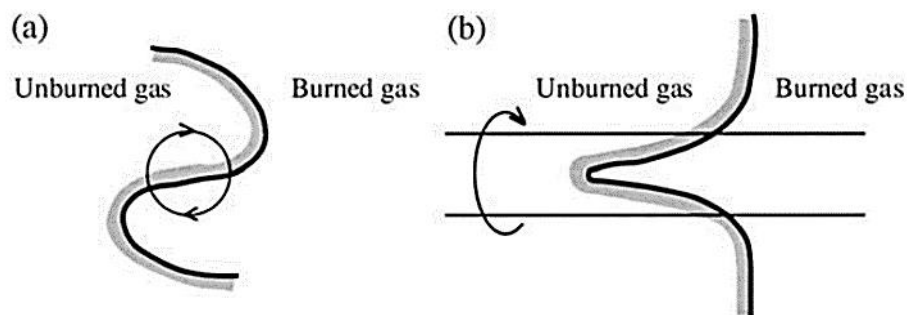
^۲ Dunn-Rankin

می‌رسد، گسترش آن به شکل چشم‌گیری کاهش می‌یابد و شعله تنها در مجاورت جریان بازگشتی یا همان چرخشی که ایجاد کرده است باقی می‌ماند.



شکل ۲-۶- بردارهای سرعت میدان جریان اندازه‌گیری شده به روش LDV به همراه تصویر جبهه شعله [۲۵]

این جریان چرخشی در گاز سوخته یک انحراف ضعیف به شعله وارد می‌کند و موجب ناپایداری در آن می‌گردد [۱۹]. دو ساختار ممکن از این برهم‌کنش جریان چرخشی و شعله در شکل ۲-۷ آورده شده است.



شکل ۲-۷- دو ساختار ممکن از برهم کنش جریان چرخشی و شعله [۲۶]

۲-۲-۲- مروری بر کارهای گذشته

اولین توضیح در مورد شتاب گرفتن شعله توسط شلکین^۱ [۲۷] ارائه شده است. او بر اساس شرط عدم لغزش بر روی دیواره شتاب گرفتن شعله را توضیح داد. با انتشار جبهه شعله، مخلوط سوخته منبسط شده و مخلوط نسوخته را به طرف جلو می راند. اصطکاک بر روی دیواره موجب غیریکنواختی جریان سیال شده و جبهه شعله را خمیده می کند. به این ترتیب سرعت شعله افزایش یافته و شعله شتاب دار می شود. با این حال از زمان شلکین یک نظر مشترک وجود دارد که شتاب گرفتن شعله بدون جریان آشفته غیرممکن است [۲۸]. پیشنهادهای دیگر در مورد شتاب گرفتن شعله مطرح شده است از جمله، ناپایداری هیدرودینامیکی لاند-داریوس [۸،۲۹] و حالت انتقال شعله کروی به شعله تخت هنگام انتشار شعله در داخل یک لوله [۲۱].

کلنت و سربی [۲۶] اولین تقسیم بندی تغییرات دینامیک شعله پیش آمیخته در محفظه باز و بسته را انجام داده اند که به چهار مرحله تقسیم می شود: (۱) شعله نیم کره در حال انبساط که هنوز تحت اثرات دیوارها قرار نگرفته است؛ (۲) شعله با حالت انگشتی و سرعت رشد نمایی؛ (۳) شعله کشیده که از ناحیه جانبی در تماس با دیواره قرار گرفته است؛ (۴) وارونگی جبهه شعله که به اسم شعله گل لاله نام گذاری شده است.

^۱ Shelkin

ماتالون و متزنر^۱ [۳۰] معتقد بودند که تغییر شکل اولیه جبهه شعله نتیجه مستقیم ناپایداری هیدرودینامیکی است، اما علت واقعی شکل‌گیری شعله لاله‌ای شکل جریان گردابه‌ای شکل ایجاد شده در مخلوط سوخته است. آن‌ها با انجام حل تحلیلی معادلات حاکم نشان داده‌اند که ناپایداری شعله در موقعیت وسط کانال شکل می‌گیرد.

بایچکوف و همکاران [۲۸] تئوری تحلیلی در مورد شتاب گرفتن شعله آرام در لوله با یک انتهای بسته و شرط عدم لغزش در دیواره و آدیاباتیک بودن دیواره را توسعه داده‌اند. آن‌ها با توجه به تعریف رینولدز برای دینامیک احتراق که متفاوت از رینولدز استاندارد جریان است، برای شتاب بی‌بعد شعله رابطه (۱-۴) و همچنین برای سرعت سوزش^۲ رابطه (۲-۴) را ارائه کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش رینولدز میزان شتاب شعله کاهش پیدا می‌کند. به‌عنوان مثال با کاهش مقطع کانال، رینولدز کاهش پیدا کرده و در نتیجه آن شتاب بی‌بعد افزایش می‌یابد و با توجه به رابطه (۲-۴) سرعت سوزش نیز افزایش می‌یابد. لازم به توضیح است که سرعت سوزش U_w با سرعت نرمال جبهه احتراق U_f متفاوت است. سرعت سوزش نشان می‌دهد که چه مقدار سوخت برحسب زمان توسط کل جبهه شعله مصرف شده است.

$$\sigma = \frac{\Theta^2}{\text{Re}_{\text{flame}}}, \quad \text{Re}_{\text{flame}} = \frac{RU_f}{\nu}, \quad \Theta = \frac{\rho_u}{\rho_b} \quad (1-4)$$

$$U_w \propto \exp(\sigma \cdot \tau), \quad \tau = U_f t / R \quad (2-4)$$

بایچکوف و همکاران [۳۱] با توسعه حل تحلیلی برای شتاب گرفتن شعله آرام در مراحل اولیه رشد شعله در یک لوله طولانی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی کلنت و سربی [۲۱] که برای مخلوط پروپان-هوا در داخل یک لوله که از یک انتها باز است، نشان داد که شتاب شعله مستقل از رینولدز شعله بوده و تنها به ضریب انبساط مخلوط ($\Theta = \rho_u / \rho_b$) وابسته است و همچنین برای موقعیت جبهه شعله در مراحل اولیه رشد رابطه (۳-۴) را ارائه کرده‌اند.

¹ Matalon and Metzner

² Burning Velocity

$$\xi_{tip} = \frac{\Theta}{2\alpha} \sinh(2\alpha\tau), \quad \xi_{tip} = \frac{Z_{tip}}{R}, \quad \alpha = \sqrt{\Theta(\Theta-1)}, \quad \tau = \frac{U_f t}{R} \quad (3-4)$$

که در آن ξ_{tip} محور طولی بی‌بعد، R شعاع لوله، Z محور طولی و τ زمان بی‌بعد است. والیف^۱ و همکاران [۳۲] با استفاده از نتایج تحلیلی بایچکوف [۳۱] مدلی برای شتاب انتشار شعله در لوله با حضور مانع برای تحلیل فرآیند گذر از احتراق به انفجار به صورت رابطه (۴-۴) ارائه کرده‌اند که در آن d ضخامت مانع، ΔZ فاصله دو مانع از یکدیگر و β نسبت انسداد است.

$$\sigma = (1 - d/\Delta z) \frac{\Theta - 1}{1 - \beta} \quad (4-4)$$

در طی انتشار شعله در یک محفظه بسته شعله تحت تأثیر مجموعه‌ای از اثرهای مختلف از جمله نیروی شناوری، ناپایداری هیدرودینامیکی، ناپایداری نفوذ حرارتی، ناپایداری رایلی-تیلور، لایه مرزی و غیره قرار می‌گیرد که آن را ناپایدار و نامنظم می‌سازد [۳۳، ۲۰، ۱۸-۳۵].

دان-رانکین و ساویر [۲۵] در سال ۱۹۹۸ به‌طور آزمایشگاهی بر روی تغییر شکل انتشار جبهه شعله در کانال‌های بسته کار کرده‌اند. مقطع کانال مربعی به ضلع ۳۸ mm بوده و پارامترهای مورد مطالعه آن‌ها تأثیر طول کانال (L) با در نظر گرفتن رنج ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ mm برای مخلوط استوکیومتری متان-هوا و برای طول ۱۵۰ mm برای مخلوط اتیلن-هوا با نسبت‌های هم ارزی ۰.۶، ۰.۷، ۰.۹، ۱.۱، $\varphi =$ بوده است. جهت عکس‌برداری از تکنیک شلرین استفاده شده است و جنس دیواره کانال از جنس پلکسی گلاس^۲ استفاده شده است. آن‌ها نشان دادند که: الف) در کانال‌های کوتاه گل لاله کمتر ایجاد می‌شود و در مواردی حتی ایجاد نمی‌شود. ب) زمان شروع گل لاله به نسبت هم ارزی یا به‌طور کلی به سرعت شعله آرام وابسته است و تقریباً از طول محفظه برای یک مقطع عرضی، مستقل است. ج) مخلوط‌هایی که سرعت سوختن آن‌ها سریع‌تر است، مقیاس ساختار جبهه آن‌ها کوچک‌تر از مخلوط‌هایی

¹ Valiev

² Plexiglass

است که سرعت سوختن کمتری دارند. د) برای مخلوط‌هایی که خیلی آهسته می‌سوزند، نیروی بویانسی بر شکل گل لاله تأثیر می‌گذارد.

زو^۱ و همکاران [۳۶-۳۸] تحقیقات بر روی نحوه انتشار شعله در شرایط مختلف را مورد بررسی قرار داده‌اند. مجموعه آزمایشگاهی آن‌ها یک کانال افقی با مقطع مستطیل با ابعاد $82 \times 82 \times 530$ mm بوده است و جهت عکس‌برداری از جبهه شعله دو وجه کانال از جنس شیشه کوارتز طراحی شده و از دوربین با سرعت 15000 frames/s استفاده کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که: الف) برای مخلوط پیش آمیخته هیدروژن-هوا شعله گل لاله در کانال یک‌طرف باز تنها در رنج $4.05 \leq \varphi \leq 1.17$ و برای کانال بسته در رنج $0.84 \leq \varphi \leq 0.49$ و $7.14 \leq \varphi \leq 4.22$ دیده می‌شود. آن‌ها نشان داند الگوهای حرکت شعله و حاشیه‌های آن در سطح تماس با دیواره به چند بخش با ویژگی‌های متمایز تقسیم می‌گردد. همچنین دو نوع هلال لاله‌ای شکل در بازه‌های متفاوت نسبت هم ارزی، در شعله مشاهده کردند. نتایج به‌دست‌آمده بر در مرحله رشد کروی شعله و شعله با شکل انگشتی همخوانی بسیار خوبی با پیش‌بینی تئوری دارد درحالی‌که در ادامه انتشار شعله باید اثرات دیواره‌ها و ناپایداری هیدرودینامیکی، موج فشاری و آشفتگی جریان مورد بررسی قرار بگیرد. آن‌ها به بررسی اثر موقعیت جرکه بر رفتار شعله نیز پرداخته‌اند. موقعیت جرکه تأثیر قابل توجهی بر دینامیک شعله دارد. از جمله تغییرات شکل شعله و همچنین اتلاف حرارتی از دیواره انتهایی اثر انبساط حرارتی محصولات احتراق و در نتیجه شتاب شعله را کاهش می‌دهد. همچنین تماس شعله با دیواره‌های داخلی آغاز شعله لاله شکل را به تأخیر می‌اندازد. آن‌ها در مطالعات جداگانه مدل‌سازی عددی در کنار مدل آزمایشگاهی خود را انجام داده‌اند [۳۹-۴۲].

زینگ^۲ و همکاران [۴۳] به‌طور آزمایشگاهی رفتارهای جبهه شعله برای مخلوط متان-هیدروژن-هوا با نسبت‌های جرمی ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ برای هیدروژن را در شش کانال بسته با ابعاد مختلف که در شکل ۲-۸ نشان داده‌شده را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که شکل شعله با تغییر

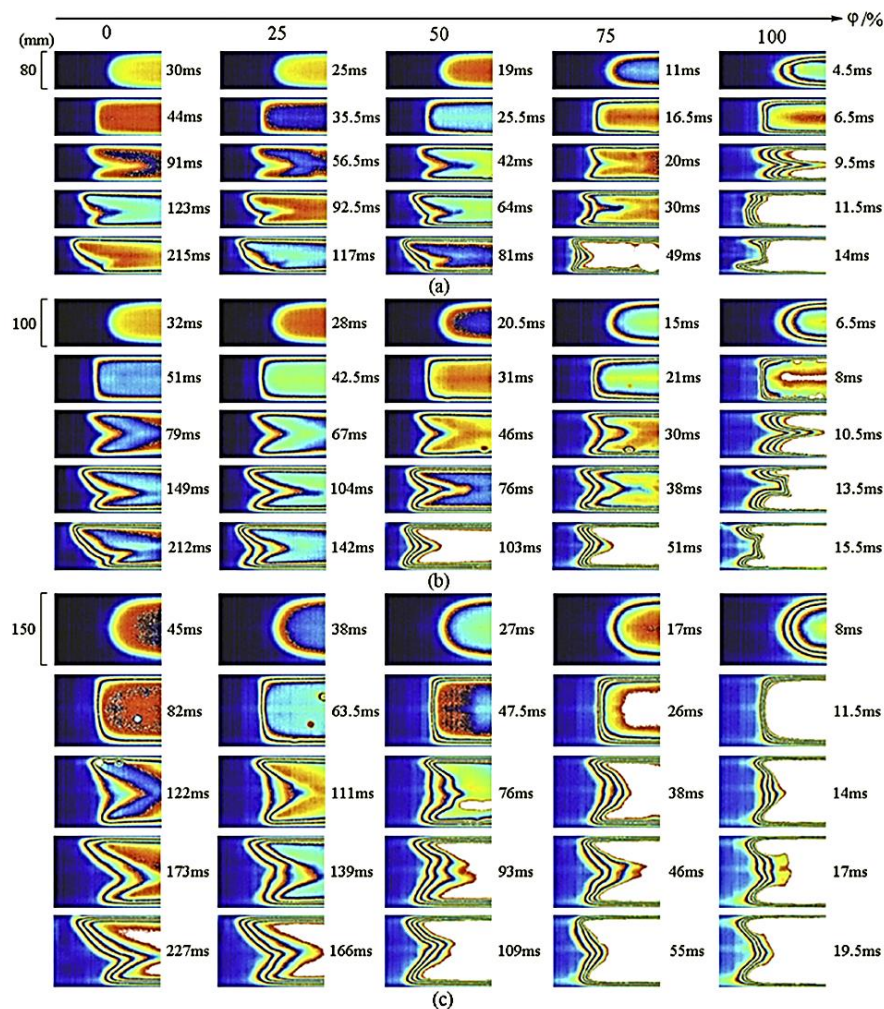
¹ Xiao

² Zheng

نسبت هیدروژن و نسبت ابعاد کانال تغییر می‌کند. در کوچک‌ترین نسبت ابعاد تنها چهار مرحله تشکیل گل لاله دیده می‌شود و در ابعاد بزرگ‌تر جبهه شعله تکامل پیدا می‌کند. آن‌ها نشان داده اند 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. یک نمونه از نتایج آن‌ها حاصل از تصویربرداری در شکل ۲-۹ آورده شده است.

Configuration	Dimensions (mm)		Volume (L)	Aspect ratio
	Width	Length		
A	80	1000	6.4	12.5
B	100	1000	10	10
C	150	1000	22.5	6.7
D	50	250	0.625	5
E	50	500	1.25	10
F	50	1000	2.5	20

شکل ۲-۸- ابعاد مدل آزمایشگاهی [۴۳]



شکل ۲-۹- تصاویر شعله برای ابعاد A، B و C با نسبت‌های مختلف هیدروژن [۴۳]

شین^۱ و همکاران [۴۴,۴۵] به‌طور آزمایشگاهی رفتارهای جبهه شعله برای هیدروژن-هوا و پروپان-هوا را در یک کانال بسته افقی با مقطع مستطیل با ابعاد ۵۳۰*۸۲*۸۲ mm مورد مطالعه قرار داده‌اند. آن‌ها نشان دادند که انحراف جبهه شعله از حالت لاله‌ای شکل منحصر به مخلوط هیدروژن-هوا نیست. هرچند این نتیجه‌گیری قبل از این مشخص بوده است ولی برای اولین بار برای مخلوط پروپان-هوا این رفتار را مشاهده و بررسی کرده‌اند. بعد از مسطح شدن شعله در مخلوط هیدروژن-هوا فشار در طول ایجاد اعوجاج و ایجاد شکل لاله‌ای جبهه شعله، به‌طور پله‌ای و ناگهانی افزایش می‌یابد، درحالی‌که در شعله پروپان-هوا مسیر تغییرات فشار کاملاً متفاوت بوده و با شیب‌خطی افزایش می‌یابد و شکل لاله‌ای جبهه شعله تشکیل می‌گردد. برخلاف تغییرات شدید سرعت جبهه شعله، نوسانات شدید فشار برای تشکیل شکل لاله‌ای شکل جبهه الزاماً نیاز نیست. مهم‌تر از همه، موج فشاری، عامل محرک اعوجاج در جبهه لاله‌ای شکل نیست، اما گاهی اوقات افزایش یا کاهش شتاب شعله و به‌هم‌ریختگی در جبهه شعله را ایجاد می‌کند. درواقع ترکیبی از اثرات دیواره، لایه‌مرزی، ناپایداری هیدرودینامیکی احتمالاً دلیل فیزیکی اصلی این پدیده است.

پونزی^۲ و همکاران [۴] با مطالعه آزمایشگاهی و تمرکز بر پدیده وارونگی شعله بر روی مخلوط استوکیومتری پروپان-هوا در یک محفظه بسته، علت این پدیده را تنها ناپایداری هیدرودینامیکی دانسته‌اند.

جین^۳ و همکاران [۴۶] به‌طور آزمایشگاهی رفتارهای جبهه شعله برای متان، استیلن و گاز طبیعی را در نسبت‌های سوخت به هوای مختلف در یک کانال بسته افقی با مقطع مستطیل با ابعاد ۵۳۰*۸۲*۸۲ mm را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که جبهه شعله گل لال کلاسیک برای گاز طبیعی در $0.44 \leq \phi \leq 0.72$ ، برای متان در $0.79 \leq \phi \leq 1.3$ و برای استیلن $1.7 \leq \phi \leq 0.40$ تشکیل می‌شود. ماهیت سوخت گاز تأثیر قابل‌توجهی بر سرعت انتشار شعله و شکل آن دارد. مقدار کم اتان و

¹ Shen
² Ponizy
³ Jin

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 می‌گردد و درعین حال استیلن دارای سریع‌ترین سرعت پخش شعله و فشار حداکثر به علت بالاتر بودن سرعت واکنش شیمیایی است.

چن^۱ و همکاران [۴۷] به‌طور آزمایشگاهی، اثر تخلخل بر روی دیواره در کانال بسته با مقطع مستطیل را بر روی جبهه شعله بررسی کردند، مجموعه آزمایشگاهی آن‌ها به‌صورت در یک کانال بسته افقی با مقطع مستطیل با ابعاد $530 \text{ mm} \times 82 \text{ mm} \times 82 \text{ mm}$ را بررسی کردند که دو وجه آن جهت عکس‌برداری از شعله از جنس شیشه کوارتز ساخته شده است. مخلوط گازی مورد مطالعه متان با درصد خلوص $99/9999\%$ است که با هوای خشک با نسبت استوکیومتری جهت احتراق مخلوط می‌گردد. برای مطالعه اثر تخلخل بر روی دیواره از پنج نوع صفحه با درصد تخلخل متفاوت از جنس نیکل استفاده شده است. نمونه‌ای از نتایج عکس‌برداری برای سطوح متخلخل مختلف در شکل ۲-۱۰ آورده شده است. آن‌ها نشان دادند که: برای چگالی تخلخل کمتر تبدیل شعله از حالت انگشتی به تخت سریع‌تر رخ می‌دهد و مواد متخلخل می‌تواند فاصله وارونگی جبهه شعله را کاهش داده و شروع شعله گل لاله را به تأخیر بیندازد.

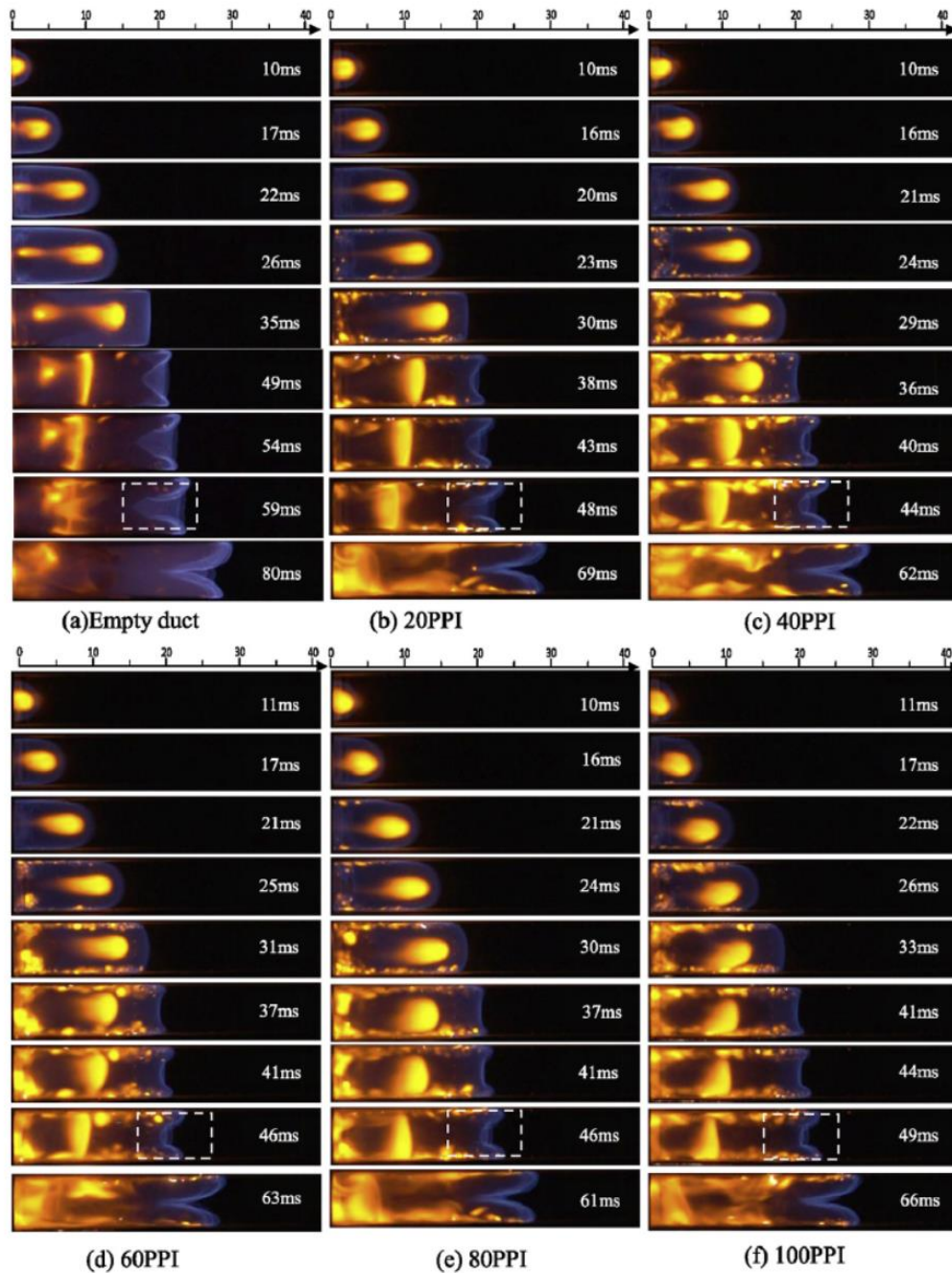
در تحقیق با شرایط مشابه، جین و همکاران [۴۸] مطالعه عددی و آزمایشگاهی بر روی تأثیر نسبت طول به عرض کانال (در بازه ۲ الی ۷.۵) بر روی مشخصه‌های جبهه شعله به‌طور عددی انجام داده‌اند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش این نسبت میزان حداکثر سرعت شعله در محفظه افزایش پیدا کرده و همچنین سرعت نرخ افزایش فشار نیز کاهش پیدا می‌کند.

ونگ^۲ و همکاران [۴۹] مطالعه آزمایشگاهی بر روی اثر انواع مانع از نظر شکل بر انتشار جبهه شعله در یک کانال با یک انتهای باز را بررسی کرده‌اند. آن‌ها نشان دادند شکل مانع تأثیر قابل توجهی بر سرعت انتشار شعله و ساختار شکل‌گیری شعله دارد.

¹ Chen

² Wang

ون^۱ و همکاران [۵۰] آرایش قرارگیری سه مانع مسطح در مسیر انتشار شعله در یک محفظه بسته را به طور آزمایشگاهی مطالعه کرده و نشان دادند سرعت و شتاب شعله تابعی از آرایش قرارگیری مانعها است.



شکل ۲-۱۰- تصویر انتشار شعله برای سطوح کانال با درصد تخلخل متفاوت [۴۷]

^۱ Wen

چن و همکاران [۵۱] با مطالعه آزمایشگاهی و عددی، اثر یک مانع نازک را در داخل محفظه بسته بررسی کردند. آن‌ها انتشار شعله را برای این حالت به پنج مرحله تقسیم کردند که شامل حالت کروی، انگشتی، جت، قارچی شکل و دوطرفه^۱ است. همچنین آن‌ها [۵۲،۵۳] در کاری مشابه اثر مانع با تعدادهای متفاوت شکاف^۲ در داخل یک صفحه به عنوان مانع را بر روی انتشار شعله متان-هوا در داخل محفظه بررسی کرده‌اند. آن‌ها از تعداد شکاف‌ها و اندازه شکاف‌های متفاوت استفاده کرده و انتشار شعله را به چهار مرحله تقسیم کرده‌اند که شامل حالت کروی، انگشتی، جت و شعله دوطرفه است.

مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی رفتار شعله و مکانیزم انتشار آن در مخلوط‌های پیش‌آمیخته و محیط‌های بسته تنها اثر ناپایداری‌های ذاتی در مکانیزم انتشار شعله بررسی شده است. در گروهی از کارهای انجام شده دیگر نیز اثر انسداد در داخل محفظه و همچنین حضور مانع‌های متنوع از نظر شکلی، بر روی رفتار شعله بررسی شده است. با توجه به افزایش راندمان مشعل‌ها به کمک محیط متخلخل [۵۴-۵۶]، مطالعه‌ی اثر محیط متخلخل بر انتشار شعله پیش‌آمیخته، در محیط بسته قابل توجه بوده و در هیچ یک از کارهای گذشته اثر محیط متخلخل که در مسیر شعله قرار داده شده باشد، بررسی نشده است و این مهم موضوع تحقیق آزمایشگاهی حاضر است.

۳-۲- جنبه‌های نوآوری پژوهش حاضر

در کار حاضر هدف بررسی اثر محیط متخلخل بر انتشار جبهه شعله پیش‌آمیخته متان-هوا به‌طور تجربی در یک کانال بسته است و اثر محیط متخلخل به کمک قرار دادن موانع متخلخل در مسیر انتشار شعله بررسی شده که نوآوری پژوهش حاضر به شرح زیر است:

الف) مطالعه‌ی اثر مانع متخلخل بر پارامترهای مؤثر در انتشار شعله متان-هوا (سرعت شعله، تغییرات فشار محفظه بسته، تشکیل ناپایداری) در یک محفظه‌ی بسته

ب) مطالعه‌ی اثر مانع صلب بر انتشار جبهه شعله متان-هوا و مقایسه آن با مانع متخلخل

¹ bidirectional

² slits

۲-۴- کاربردهای پژوهش

احتراق گازهایی همچون هیدروژن، متان، پروپان و اتیلن به طور گسترده‌ای در زندگی روزمره و صنایع استفاده می‌شوند، به طور خاص در مهندسی پتروشیمی، تولید برق، متالوژی، معدن، حمل‌ونقل و گازرسانی کاربرد بسیار دارد. گازها به طور بالقوه 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. در صورتی که یک منبع جرقه ایجاد شود و واکنش مخلوط آغاز شود احتراق شکل گرفته و به احتراق سریع تبدیل می‌گردد و در شرایط مناسب احتراق سریع به انفجار و انفجار قوی تبدیل می‌گردد. امواج احتراق سریع با سرعت مادون صوت منتشر می‌شوند در حالی که انفجار با سرعت مافوق صوت منتشر شده و بسیار مخرب است. از این رو مطالعه رفتار شعله در شرایط مختلف دارای اهمیت بسیار ویژه‌ای است و غیر از موارد خاص که فرآیند انفجار سوخت در صنعت مورد نیاز است همواره از ایجاد این فرآیند جلوگیری می‌گردد و مطالعات انجام شده در جهت جلوگیری از تشکیل موج انفجار ناخواسته صورت می‌پذیرد. البته در موتورهای احتراق داخلی نیز رفتار شعله و تشکیل موج‌های فشاری نیز از اهمیت بسیار زیادی برخوردار بوده و کسب دانش در مورد رفتار شعله در محیط بسته به بهبود عملکرد آن کمک بسیاری خواهد کرد. در کاربردهای ویژه‌ای همچون موتورهای انفجار پالسی (PDE)^۱ هدف فرآهم کردن شرایطی است که در مخلوط گازی انفجار سریع تر رخ بدهد و برای این مهم از ایجاد انواع تکنیک‌های تولید آشفستگی در جریان استفاده می‌شود [۵۷]. از طرف دیگر، به دلیلی کمبود منابع انرژی فسیلی و مشکلات گرم‌شدن کره‌زمین، بهبود بهره‌وری حرارتی دستگاه‌های احتراقی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، مورد توجه بسیاری است. مکانیزم احتراق و ساختار شعله باتوجه به کاربردهای

^۱ Pulse detonation Engine

مختلف متفاوت است. یک‌موتور احتراق داخلی [۵۸] نمونه‌ای از فرآیند احتراق در محیط بسته است. فرآیند احتراق، شکل‌گیری شعله و مکانیزم رشد، به شرایط مختلف، مانند درجه حرارت اولیه، شرایط مرزی، نوع سوخت و انرژی احتراق جرقه بستگی دارد. در بسیاری از برنامه‌های کاربردی، انفجار درون سیلندر یک پدیده مخرب است که علم احتراق می‌تواند آن را کاملاً کنترل کند [۳۱]. از سوی دیگر، متان به عنوان یکی از سوخت‌های جایگزین امیدوارکننده محسوب می‌شود زیرا نشان می‌دهد که میزان انتشار آلاینده‌ها پایین‌تر است و نسبت به سوخت‌های معمولی بسیار مقرون به صرفه است. متان دارای تعداد اکتان تحقیقاتی بالا^۱ (RON=110-130) و نسبت کربن و هیدروژن پایین است و تولید CO₂ کمتری را در واحد انرژی آزاد می‌کند [۵۹,۶۰]. با توجه به مطالب بیان شده موضوع تحقیق حاضر مطالعه رفتار شعله متان-هوا در محفظه بسته بوده و تاثیر محیط متخلخل بر رفتار شعله بررسی شده است.

¹ Research octane number

فصل ۳- تجهیزات آزمایشگاهی و

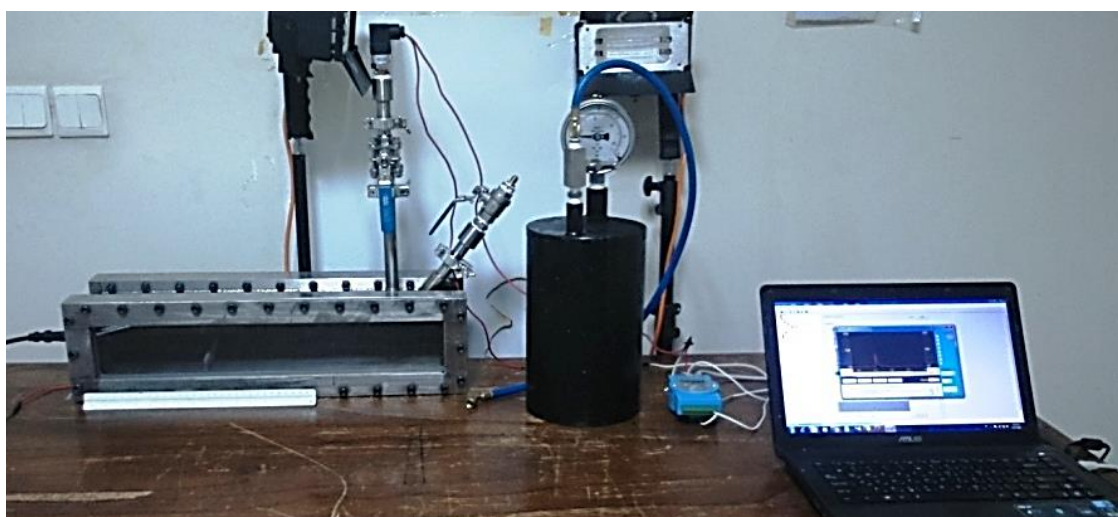
اهداف تحقیق

۳-۱- مقدمه

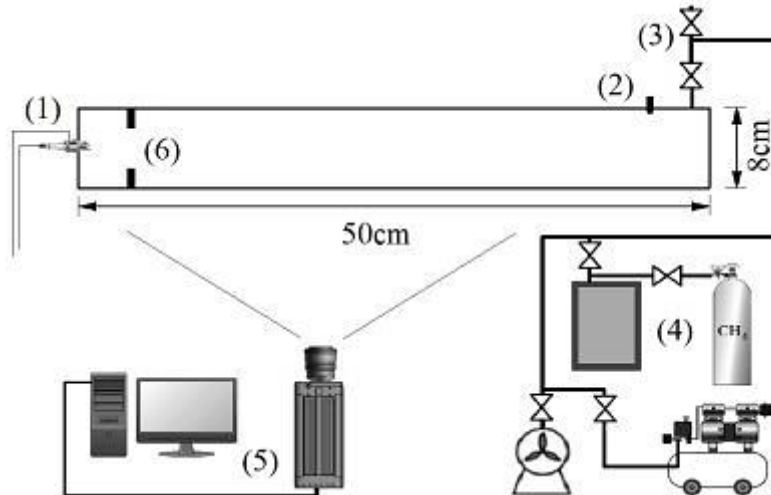
در پژوهش حاضر، هدف مطالعه و بررسی انتشار شعله پیش آمیخته در یک کانال بسته است. با توجه به مطالعات انجام شده در این زمینه که به صورت‌های عددی و آزمایشگاهی می‌باشند، در کار حاضر مطالعه به روش آزمایشگاهی صورت خواهد گرفت و برای این منظور تجهیزات مورد نیاز ساخته شده است که در ادامه جزئیات مربوط به آن ذکر خواهند شد.

۳-۲- مدل آزمایشگاهی

تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۳-۱ و شکل ۳-۲ به صورت نمای واقعی و شماتیک نشان داده شده است. محفظه بسته احتراق دارای طول ۵۰ cm، ارتفاع ۸ cm و عمق ۱۱ cm است. جنس ورق به کاررفته برای ساخت محفظه، فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به ضخامت ۱.۵ mm است. سطوح داخلی محفظه با استفاده از سمباده با درجه زبری ۴۰۰ به طور کامل صیقل داده شده است. جهت امکان تصویربرداری از شعله یک وجه محفظه (۸×۵۰ cm) از جنس پلکسی گلس شفاف با ضخامت ۲۰ mm استفاده شده است.



شکل ۳-۱- نمای واقعی مجموعه آزمایشگاهی

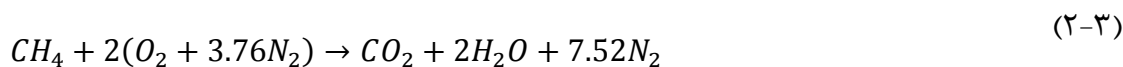


شکل ۳-۲- شماتیک مجموعه آزمایشگاهی (۱) جرقه زن (شمع) (۲) حسگر فشار (۳) ورودی و خروجی گاز (۴) مجموعه تهیه مخلوط پیش آمیخته و تزریق گاز (۵) دوربین سرعت بالا (۶) موانع

۳-۲-۱- مخلوط گازی

برای تهیه مخلوط پیش آمیخته متان-هوا، یک محفظه اختلاط که در شکل ۳-۳ نشان داده شده از لوله آهنی بدون درز با قطر ۶ اینچ و ضخامت ۷ میلی متر و طول ۲۷ سانتی متر ساخته شده و استفاده شده است. حجم محفظه اختلاط تقریباً ۶ درصد بزرگتر از محفظه احتراق طراحی شده است. تهیه مخلوط استوکیومتری، به کمک فشارهای نسبی هر گونه شیمیای تهیه می شود [۶۱-۶۴]. فرآیند اختلاط به این صورت است که ابتدا محفظه اختلاط دارای فشار نسبی صفر از هوای کمپرسور پر بوده و به میزان 0.4 bar فشار متان با درجه خلوص ۹۹.۹۹ درصد به داخل محفظه اختلاط تزریق می شود. در ادامه تا فشار نسبی نهایی 3 bar هوای کمپرسور به داخل محفظه تزریق می شود. با توجه به در نظر گرفتن فشار اولیه 1 bar در محفظه احتراق برای انجام آزمایشها، مخلوط آماده شده برای انجام سه دفعه آمایش کافی است. با استفاده از فشارهای نسبی مطلق هر گاز، $P_{ch_4} = 0.4 \text{ bar}$ ، $P_{air} = 3.6 \text{ bar}$ ، $P_{Total} = 4 \text{ bar}$ و کسر مولی متان و هوا در مخلوط تهیه شده با توجه به رابطه (۱-۳) به ترتیب برابر $C_{ch_4} = \frac{0.4}{4} = 0.1$ ، $C_{air} = \frac{3.6}{4} = 0.9$ و برای حالت استوکیومتری با توجه به رابطه (۲-۳) $C_{stoic-ch_4} = \frac{1}{10.52} = 0.095$ ، $C_{stoic-air} = \frac{9.52}{10.52} = 0.905$ است. با توجه به رابطه (۳-۳) و کسر مولی های گاز، نسبت هم ارزی مخلوط تهیه شده برابر $\phi = \frac{0.1/0.9}{0.095/0.905} = 1.06$ خواهد شد.

$$C_i = \frac{n_i}{n_T} = \frac{P_i}{P_T} \quad (1-3)$$



$$\varphi = \frac{(Fuel/Air)_{act}}{(Fuel/Air)_{stoic}} \quad (3-3)$$

فرآیند تزریق مخلوط به محفظه احتراق به این صورت است که ابتدا داخل محفظه با هوای کمپرسور جایگزین می‌شود و در ادامه فشار محفظه احتراق با کمک پمپ خلأ تا فشار مطلق 0.05 bar کاهش داده می‌شود سپس مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا که داری کسر مولی 0.1 برای متان و $\varphi = 1.06$ است در محفظه تا فشار نهایی 1 bar به آرامی تزریق می‌گردد. در واقع میزان سهم فشار مخلوط تزریق شده برابر 0.95 bar است و سهم متان از این فشار برابر 0.1 آن یعنی مقدار 0.095 bar و فشار جزئی هوا برابر 0.905 است. با توجه به رابطه (5) کسر مولی نهایی متان برابر $C_{ch_4} = \frac{P_{ch_4}}{P_T} = \frac{0.095}{1} = 0.095$ و کسر مولی هوا برابر $C_{air} = \frac{P_{air}}{P_T} = \frac{0.905}{1} = 0.905$ شده است. در حالت نهایی مخلوط آماده شده در محفظه جهت آزمایش، مخلوط استوکیومتری متان-هوا ($\varphi = 1$) است.



شکل ۳-۳- محفظه ساخته شده برای مخلوط کردن سوخت و هوا

۳-۲-۲- دوربین سرعت بالا

دوربین استفاده شده برای این پژوهش، در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. دوربین دارای سرعت عکس برداری ۴۵۰۰ فریم بر ثانیه است که در پژوهش حاضر با توجه به نوع سوخت مورد مطالعه و پدیده مورد نظر از سرعت ۱۰۰۰ فریم بر ثانیه استفاده شده و جایگاه مکانی دوربین به طور شماتیک در شکل ۳-۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است، دوربین توانایی عکس برداری رنگی را نیز دارد و مشخصات فنی آن در پیوست ع- آورده شده است.



شکل ۳-۴- دوربین سرعت بالا

۳-۲-۳- حسگر فشار

تغییرات فشار داخل محفظه احتراق به کمک مبدل فشار^۲ WIKA مدل S-10 که در رنج فشار -۰ تا ۱۰ bar اندازه گیری انجام می دهد و زمان واکنش^۳ نسبت به تغییرات فشار کوچک تر از ۱ ms است، استفاده شده و جهت ثبت اطلاعات در کامپیوتر از ثبت کننده اطلاعات^۴ ADAM^۵ مدل ۶۰۱۷ با سرعت

^۱ Sensor

^۲ Pressure transmitter

^۳ Time response

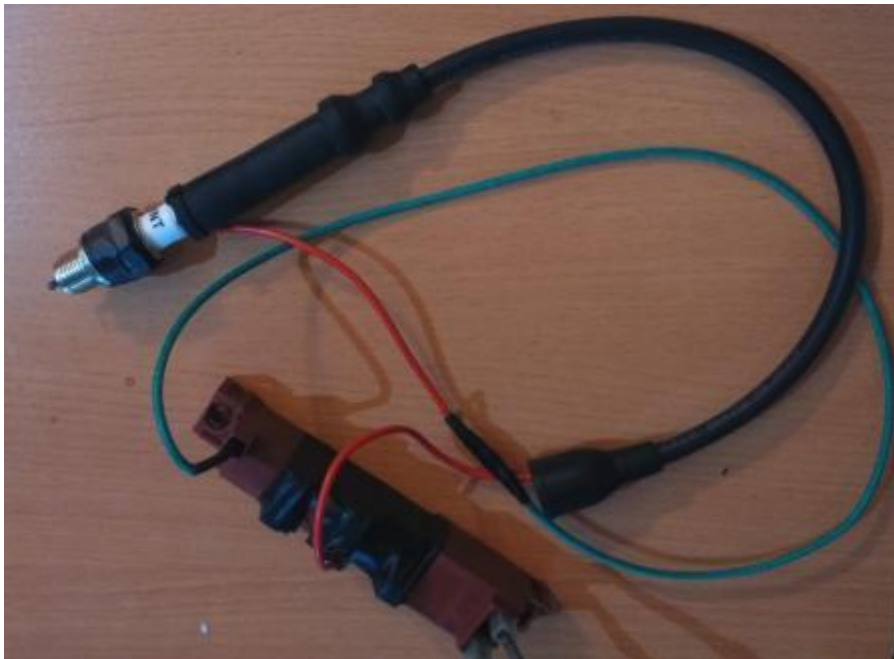
^۴ Data logger

^۵ Advantech's data acquisition modules

۵۰ میلی‌ثانیه که مشخصات فنی آن در پیوست ف- آورده شده، استفاده شده است. محل نصب مبدل فشار در فاصله ۱۵ سانتیمتری از انتهای سمت راست محفظه است. مشخصات فنی حسگر در پیوست م- و گواهی تنظیم آن نیز در پیوست ن- آورده شده است. جهت اندازه‌گیری فشار در محفظه اختلاط نیز از گیج فشار WIKA 233.50 با صفحه ۱۰ cm که مشخصات فنی آن در پیوست س- استفاده شده است و دارای رنج فشار ۰-۶ bar می‌باشد.

۳-۲-۴- سیستم جرقه‌زن

جرقه ایجاد شده برای شروع احتراق باید ضعیف باشد تا شعله آرام ایجاد کرده و مانع از ایجاد موج‌های فشاری قوی و به هم ریخته شدن ساختار پدیده مورد مطالعه گردد. جهت ایجاد جرقه از ترانس ولتاژ بالا که در شکل ۳-۵ نشان داده شده و شمع که در شکل ۳-۶ الف و ب نشان داده شده استفاده شده است. محل قرارگیری شمع جرقه‌زن، مرکز وجه ابتدایی محفظه است.



شکل ۳-۵- ترانس جرقه‌زن به همراه شمع

برای کاهش اغتشاش‌های اولیه ایجاد شده در زمان شکل‌گیری شعله، نوک انقی شمع که در شکل ۳-۶ دیده می‌شود، قطع شده است. فاصله خالی بین دو قطب مثبت و منفی شمع برای تولید جرقه در حدود ۴ میلی‌متر است.



الف) نمای شمع جرقه‌زن



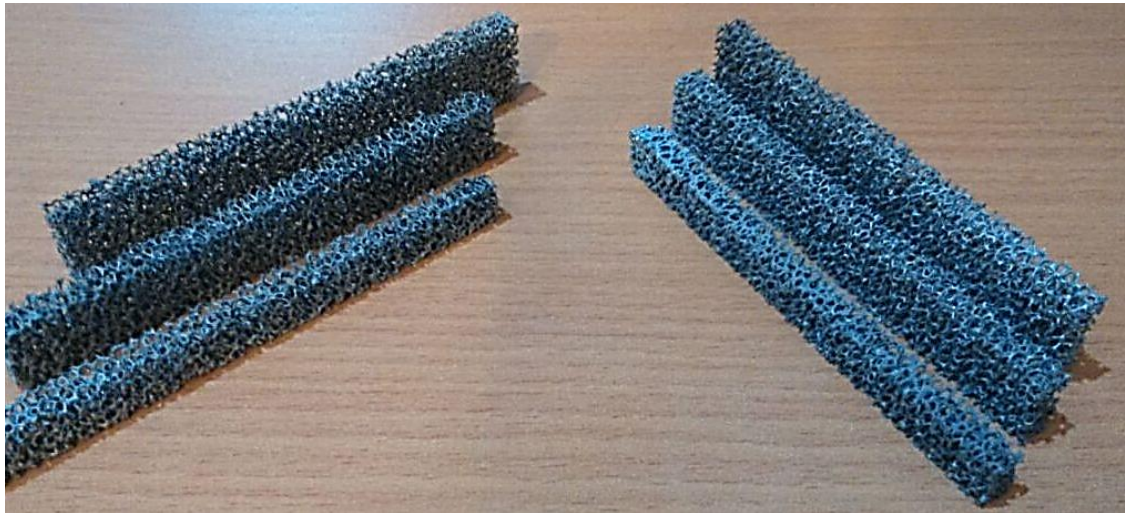
الف) نمای شمع اصلاح و نصب شده

شکل ۳-۶- شمع جرقه زن

۳-۲-۵- محیط متخلخل

محیط متخلخل به صورت مانع متخلخل در مسیر جریان احتراق ایجاد شده است. جنس مانع متخلخل در داخل محفظه احتراق به دلیل دمای بالای محصولات احتراق و پدیده موردنظر الزاماً باید از جنس مقاوم به حرارت باشند. برای این منظور از فوم‌های متخلخل فلزی از جنس نیکل استفاده شده است. شکل ۳-۷ فوم‌های متخلخل ساخته شده که دارای طول ۱۱ cm و ضخامت ۰.۷ cm و در سه ارتفاع مختلف ۱۰، ۱۵، ۲۰ میلی‌متر است را نشان می‌دهد. درصد تخلخل فوم‌ها ۹۵ درصد و دارای ۲۰ حفره در اینچ مربع و ضخامت دیواره‌های داخلی در حدود ۰.۵ mm است. نحوه قرارگیری مانع‌ها به این صورت است که دو عدد مانع هم‌اندازه به صورت قرینه در یک مقطع از محفظه قرار داده می‌شوند و مقطع مقابل جریان محیط متخلخل شده است. برای مثال مانع با ارتفاع $h_{Obst} = 30 \text{ mm}$ که از ترکیب دو مانع

۱۰ و ۲۰ میلی‌متری تشکیل شده است که در فاصله ۵ cm از محل جرقه در شکل ۳-۸ نشان داده شده است. اثر این مانع‌ها در چهار فاصله مختلف از محل جرقه به صورت، حالت ۱: ۵ cm، حالت ۲: ۱۰ cm، حالت ۳: ۱۵ cm و حالت ۴: ۲۰ cm و هر حالت با چهار ارتفاع مانع ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ میلی‌متر بررسی شده است.



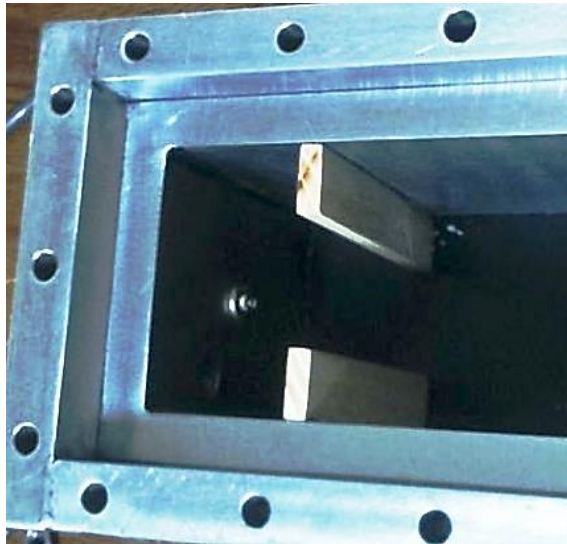
شکل ۳-۷- مانع‌های متخلخل از جنس نیکل

۳-۲-۶- مانع صلب

در این پژوهش جهت تحلیل عمیق‌تر بر روی مانع متخلخل و مقایسه اثرهای آن بر جبهه شعله، مانع صلب از جنس چوب به ابعاد طول ۱۱ cm و ضخامت ۰.۷ cm و ارتفاع $h_{Obst} = 20$ mm که از نظر ابعاد کاملاً مشابه مانع متخلخل با ارتفاع ۲۰ mm است ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است. این مانع چوبی در شکل ۳-۹ نشان داده شده است.



شکل ۳-۸- نحوه قرارگیری مانع با ارتفاع ۳۰ mm در فاصله ۵ cm در داخل محفظه



شکل ۳-۹- نحوه قرارگیری مانع صلب از جنس چوب با ارتفاع ۲۰ mm در فاصله ۵ cm در داخل محفظه

۳-۲-۷- آب‌بندی محفظه احتراق و اتصالات مربوطه

جهت ایجاد آب‌بندی محفظه، از واشر سیلیکونی یک‌تکه بین سطح پلگسی گلس با محفظه فولادی استفاده شده است. محل قرارگیری واشر در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است. اتصالات برای نصب حسگر فشار، شیر تزریق گاز و خروج گاز از اتصالات جوشی و مخصوص محیط خلاء استفاده شده است.



شکل ۳-۱۰- نمای قرارگیری واشر سیلیکونی برای آببندی محفظه

جهت اطمینان نهایی از کیفیت آببندی محفظه، تست خلاء بر روی آن انجام شده است. شرایط تست به این صورت بوده است که محفظه در شرایط خلاء قرار داده شده و با گذشت ۴۸ ساعت فشار داخل محفظه تغییر نداشته است. محفظه اختلاط دارای اتصالات دنده‌ای بوده و با کیفیت بسیار خوبی اجرا شده است. آزمایش کیفیت آببندی نیز بر روی آن انجام شده و نتیجه مشابه محفظه احتراق کاملاً قابل اطمینان بوده است.

۳-۲-۸- تحلیل خطاها و فاصله اطمینان^۱

وسایل اندازه‌گیری استفاده شده در این تحقیق عبارتند از: ۱- دوربین سرعت بالا ۲- مبدل فشار (استفاده شده برای سنجش فشار داخل محفظه احتراق) ۳- گیج فشار (استفاده شده برای محفظه مخلوط‌کننده سوخت و هوا).

دوربین سرعت بالا با توجه به کیفیت بالای مدل استفاده شده و شرایط نگهداری ویژه آن، که در اتاق مخصوص عکس‌برداری نگهداری و استفاده می‌شود، و با تنظیم نرخ تعداد عکس بر ثانیه میزان

^۱ Confidence interval

دقت آن تعیین می‌گردد. در کار حاضر دقت میلی‌ثانیه یا همان ۱۰۰۰ فریم بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

مبدل فشار نیز با توجه به گواهی تنظیم آن که در پیوست ن- آورده شده است دارای میزان خطا ۰.۲ درصد می‌باشد. که از آن برای سنجش فشار اولیه مخلوط در داخل محفظه احتراق استفاده شده است که دقت قابل قبولی دارد.

گیج فشار که بر روی محفظه اختلاط نیز نصب شده است، برای سنجش فشار نسبی هوا و فشار نسبی متان تزریق شده به داخل محفظه اختلاط استفاده می‌شود. با توجه به مشخصات فنی در پیوست س- گیج فشار دارای خطای یک درصد بوده و با توجه به کیفیت قطعات محصول استفاده شده، از دقت قابل قبولی برخوردار است.

جهت اطمینان از دقت تمامی وسایل اندازه‌گیری، هر آزمایش را سه بار تکرار کرده 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 زیر محاسبه کرده و میزان دقت ابزارها و روش کار مشخص می‌گردد [۶۵،۶۶].

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (۵-۴)$$

$$SE = \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (۶-۴)$$

$$CI = SE * 3.182 \quad (۷-۴)$$

در روابط بالا \bar{x} مقدار میانگین کمیت، n تعداد دفعات تکرار یک آزمایش است که برای حالت محفظه بدون حضور مانع، جهت برآورد میزان دقت تجهیزات آزمایشگاهی برابر ۴ می‌باشد.

عدم قطعیت که حاصل میزان خطای وسیله اندازه‌گیری تقسیم بر بازه اندازه‌گیری وسیله است برای هر مورد به صورت زیر قابل محاسبه است :

الف) گیج فشار استفاده شده دارای بازه ۰-۶ bar و دارای خطای ۱ درصد است که میزان عدم قطعیت کمیت فشار اندازه گیری شده توسط آن برابر ۰.۱۶ خواهد بود. لازم به ذکر است که از این کمیت برای محاسبات ویژه‌ای استفاده نشده است و تنها برای تنظیم نسبت فشار نسبی هوا و متان استفاده شده است.

ب) مبدل فشار نیز دارای بازه ۰-۱۰ bar بوده و دارای خطای ۰.۲ درصد نیز می‌باشد. میزان عدم قطعیت برای مبدل فشار نیز ۰.۰۲ درصد خواهد بود و از این کمیت هم برای محاسبه ویژه‌ای استفاده نشده است.

فصل ۴ - نتایج

تمام آزمایش‌های انجام‌شده در دمای 25°C و فشار اولیه مخلوط برابر ۱ bar است. جهت اطمینان از صحت کارکرد مجموعه آزمایشگاهی و همچنین بهترین حالت عکس‌برداری، آزمایش‌ها برای هر حالت، حداقل سه دفعه تکرار شده‌اند. لازم به ذکر است بعد از انجام هر حالت آزمایش، داخل محفظه با دقت بسیار تمیز شده و در صورت نیاز شستشو داده شده است. آزمایش‌های انجام شده در جدول ۴-۱ آورده شده است و به این ترتیب می‌باشد: ۱- بدون حضور مانع ۲- با حضور مانع صلب با ارتفاع ۲۰ میلی‌متر ۳- با حضور مانع متخلخل با ارتفاع ۲۰ میلی‌متر ۴- با ارتفاع ۲۵ میلی‌متر ۵- با ارتفاع ۳۰ میلی‌متر و ۶- با ارتفاع ۳۵ میلی‌متر، همچنین برای تمامی اندازه‌های مانع اثر چهار فاصله مختلف از محل جرقه (حالت ۱: ۵ cm، حالت ۲: ۱۰ cm، حالت ۳: ۱۵ cm و حالت ۴: ۲۰ cm بررسی شده است.) مورد آزمایش قرار گرفته است. قابل توجه است. ارتفاع مانع‌ها ($h_{\text{Obst}} = 20 \text{ mm}, 25 \text{ mm}, 30 \text{ mm}, 35 \text{ mm}$) به‌اختصار تعریف شده که از آن در نمودارها استفاده شده است.

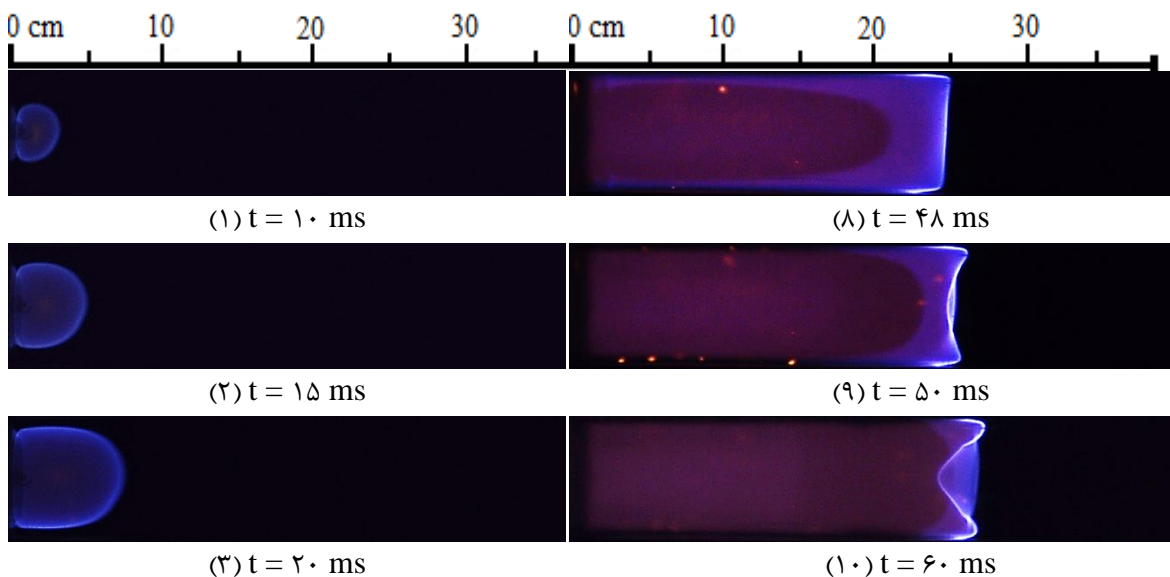
جدول ۴-۱- حالت‌های مختلف آزمایش شده

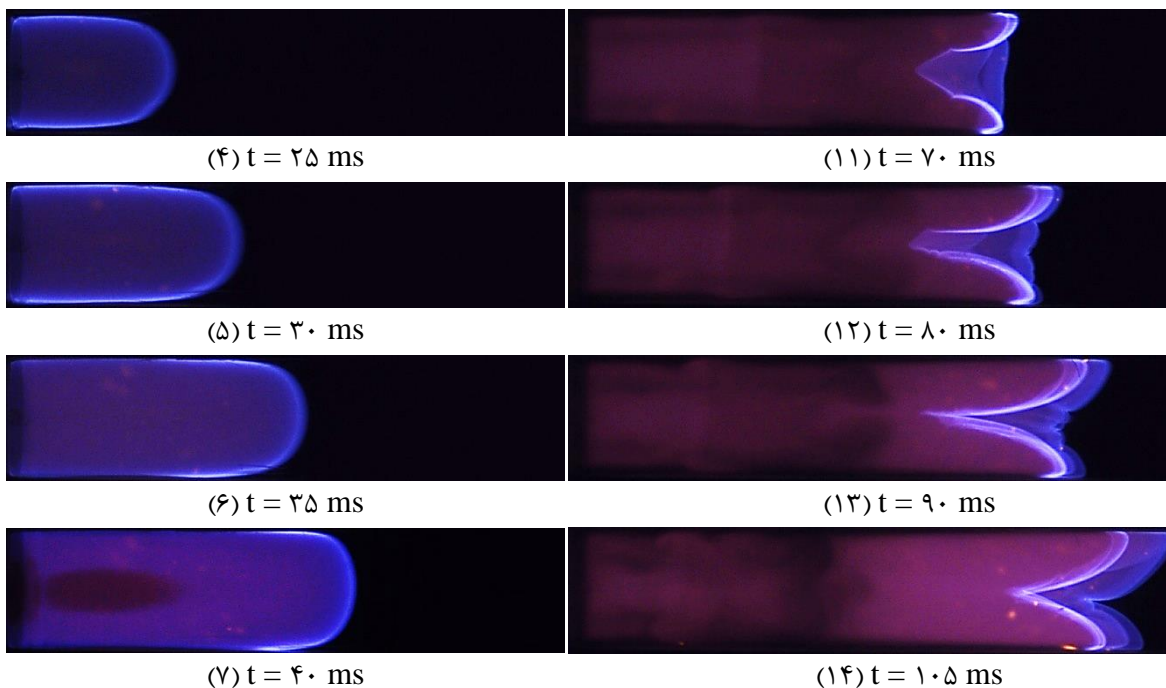
حالت‌های آزمایش شده		
۱- بدون حضور مانع		
فاصله مانع از محل جرقه ۵ cm (حالت ۱)	۲- با حضور مانع صلب $h_{\text{Obst}}=20 \text{ mm}$	
فاصله مانع از محل جرقه ۱۰ cm (حالت ۲)		
فاصله مانع از محل جرقه ۱۵ cm (حالت ۳)		
فاصله مانع از محل جرقه ۲۰ cm (حالت ۴)		
حالت ۱ الی ۴	$h_{\text{Obst}}=20 \text{ mm}$	۳- با حضور مانع متخلخل
حالت ۱ الی ۴	$h_{\text{Obst}}=25 \text{ mm}$	
حالت ۱ الی ۴	$h_{\text{Obst}}=30 \text{ mm}$	
حالت ۱ الی ۴	$h_{\text{Obst}}=35 \text{ mm}$	

۴-۲- رفتار شعله بدون حضور مانع

شکل ۴-۱ تصاویر حاصل از عکس برداری از فرآیند انتشار جبهه شعله مخلوط استوکئومتری متان- هوا در شرایط اتاق عکس برداری تاریک را نشان می‌دهد. نتایج تشکیل گل لاله کلاسیک را که شامل تشکیل شعله کروی، حالت انگشتی، حالت تخت و تشکیل گل لاله است را نشان داده و از لحاظ شکلی و ترتیب مراحل رشد شعله به خوبی با نتایج مشابه [۴۶، ۴۳، ۴۰، ۳۰، ۲۵-۴۸، ۶۷] هم‌خوانی داشته و بر اساس نتایج ماتالون و متززر [۳۰] تخت شدن شعله در وسط کانال (در فاصله ۲۴۹ mm از محل جرقه) 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 ms جبهه شعله به طور کامل تخت شده و فرآیند وارونگی جبهه شعله (پدیده گل لاله) آغاز می‌گردد. در ادامه پیشرفت شعله، شعله گل لاله در جبهه شعله در محدوده زمانی ۸۰ ms به طور کامل تشکیل شده است.

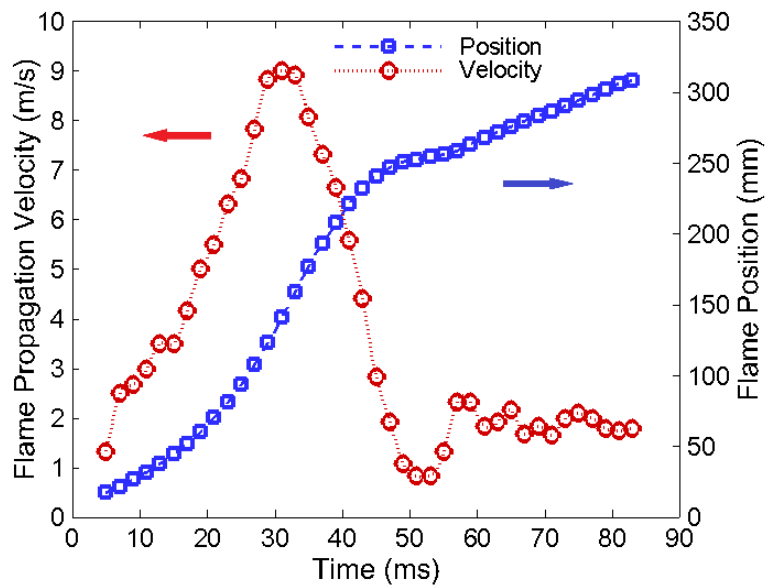
همان‌طور که در شکل ۴-۱ دیده می‌شود لبه بالایی گل لاله از لبه پایینی مقدار کمی جلو زده است و با نتایج زنگ [۴۳] هم‌خوانی دارد. با توجه به نتایج دان-رانکین [۲۵] دلیل آن سرعت واکنش نسبتاً کند متان و هم‌چنین ابعاد محفظه در پژوهش حاضر بوده که امکان تأثیر نیروی شناوری بر پدیده موردنظر را فراهم کرده و شکل جبهه شعله به این صورت تغییر شکل داده است.





شکل ۴-۱- تصویر شعله مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا در محفظه بسته بدون حضور مانع

شکل ۴-۲ موقعیت جبهه و سرعت نوک شعله را برحسب زمان نشان می‌دهد. در زمان 51 ms و موقعیت شعله در فاصله 25 cm شیب خط تقریباً صفر شده که نشان‌دهنده توقف شعله به‌طور لحظه‌ای بوده و با توجه به شکل شعله، همان آغاز برگشت جبهه شعله و مقدمه تشکیل شعله گل لاله نیز است. شعله در ابتدای رشد خود با سرعت 1.33 m/s شروع به رشد کرده و از زمان 15 ms تا 30 ms با شتاب ثابت حدوداً 366 m/s^2 رشد کرده و حداکثر سرعت شعله به مقدار 9 m/s می‌رسد. در ادامه شتاب جبهه شعله منفی شده و سرعت جبهه تا مقدار نزدیک به صفر میل می‌کند. پدیده برگشت جبهه شعله همگام با توقف لحظه‌ای نوک جبهه شعله اتفاق می‌افتد و در ادامه جبهه شعله به شکل گل لاله با سرعت تقریبی 1.8 m/s به پیشروی ادامه می‌دهد.



شکل ۴-۲- موقعیت جبهه و سرعت نوک شعله برحسب زمان

با تعریف عدد فرود^۱ به صورت رابطه (۴-۱) [۳۶]:

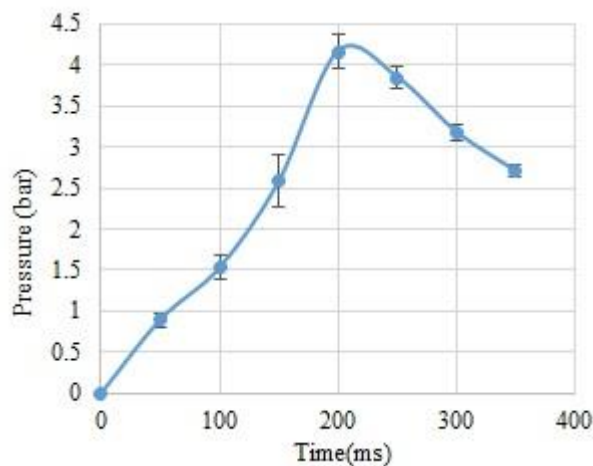
$$Fr = \frac{gW}{U_f^2} \quad (۴-۱)$$

که در آن g شتاب گرانش زمین ($g=9.81 \text{ m/s}^2$)، W عمق کانال ($W=0.11 \text{ m}$) و U_f نیز سرعت جبهه شعله است ($U_f = 1.8 \text{ m/s}$) بنابراین عدد فرود برای این شرایط برابر $Fr = 0.333$ خواهد شد. با شرایط اولیه حاکم بر آزمایش انجام شده ناپایداری به وجود آمده در جبهه شعله که در بخش‌های ۱۱ تا ۱۴ شکل ۴-۱ دیده می‌شود تقریباً متقارن بوده و تنها مقدار کمی لبه بالای جبهه شعله از لبه پایینی جلو زده است. مقدار عدد فرود محاسبه شده هم‌خوانی بسیار خوبی با عدد فرود بحرانی محاسبه شده توسط جین و همکاران [۴۶] که مقدار $Fr_c = 0.3$ را برای مخلوط متان-هوا محاسبه کرده‌اند دارد. در نتیجه شرایط اولیه آزمایش‌های انجام شده شرایطی نزدیک به حالت بحرانی، برای ناپایداری ناشی از نیروی شناوری، ایجاد می‌کند.

شکل ۴-۳ تغییرات فشار میانگین داخل محفظه را برحسب زمان نشان می‌دهد. مقادیر فشار برای چهار دفعه تکرار آزمایش و همچنین مقدار میانگین آن‌ها به همراه فاصله اطمینان با دقت ۹۵ درصد

^۱ Froude number

است. هم‌خوانی نتایج برای چهار دفعه تکرار آزمایش نشان‌دهنده دقت قابل‌قبول برای ابزارهای اندازه‌گیری به‌کاررفته و همچنین روش مخلوط و تزریق گاز و سیستم جرقه‌زنی نیز است. حداکثر فشار داخل محفظه در طی این فرآیند در حدود ۴.۲ bar است که انطباق بسیار خوبی با کار مشابه که توسط دان-رانکین و همکاران [۲۵] انجام‌گرفته است داشته که دلیلی بر صحت ابزارهای اندازه‌گیری و مجموعه آزمایشگاهی ساخته‌شده و درستی روش کار حاضر نیز هست.



شکل ۳-۴- تغییرات فشار داخل محفظه بسته بدون حضور مانع برحسب زمان

۳-۴- رفتار شعله با حضور مانع متخلخل و صلب با ارتفاع ۲۰ میلی‌متر

در این بخش اثر مانع متخلخل با ارتفاع $h_{Obst} = 20 \text{ mm}$ و مانع صلب که از نظر ابعاد مشابه آن است جهت مقایسه و تحلیل بهتر در کنار یکدیگر نمایش داده‌شده است.

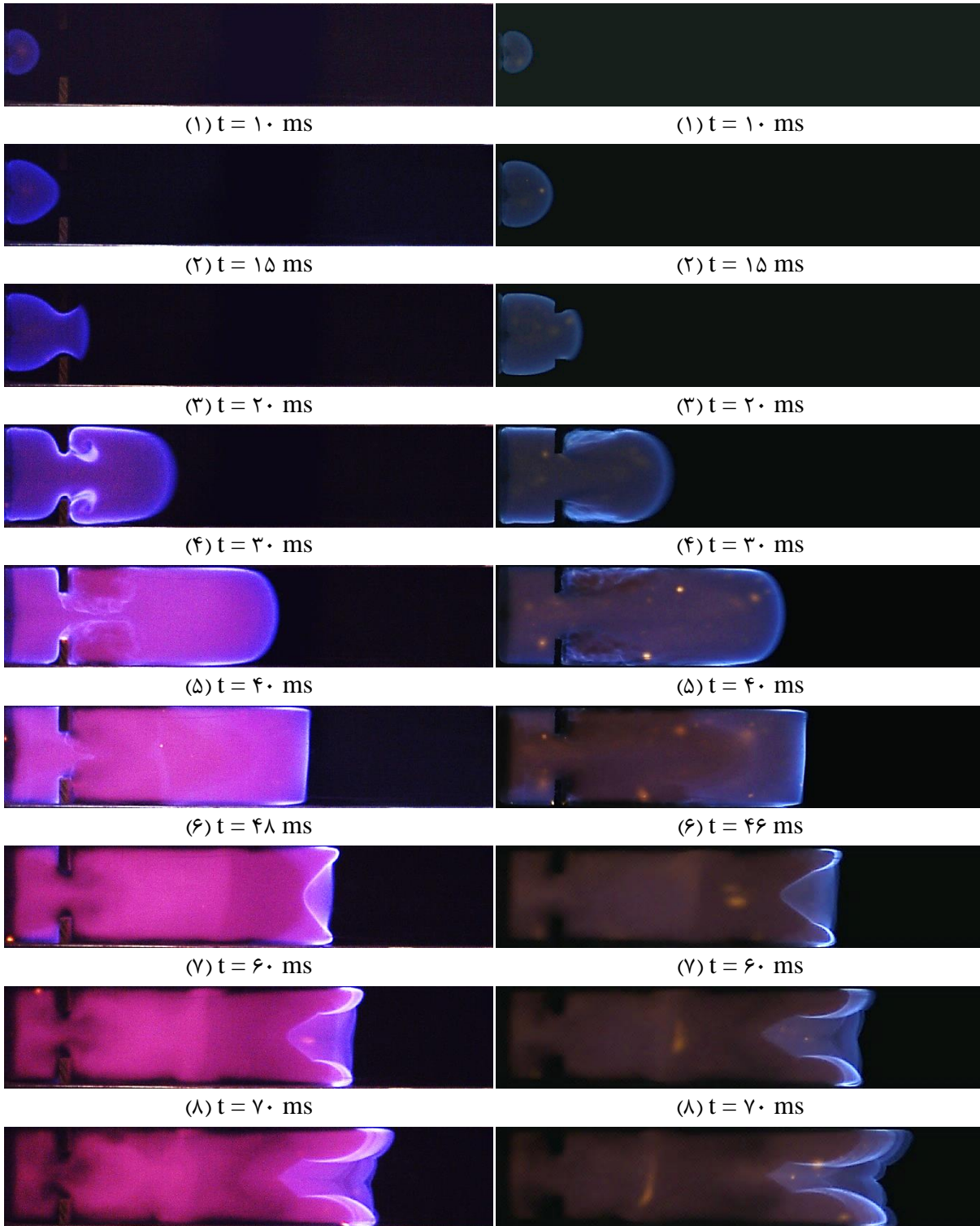
حالت‌های آزمایش‌شده شامل موقعیت‌های مکانی مانع برای چهار فاصله مختلف: حالت ۱: ۵ cm، حالت ۲: ۱۰ cm، حالت ۳: ۱۵ cm و حالت ۴: ۲۰ cm از محل جرقه مورد آزمایش قرار گرفته است.

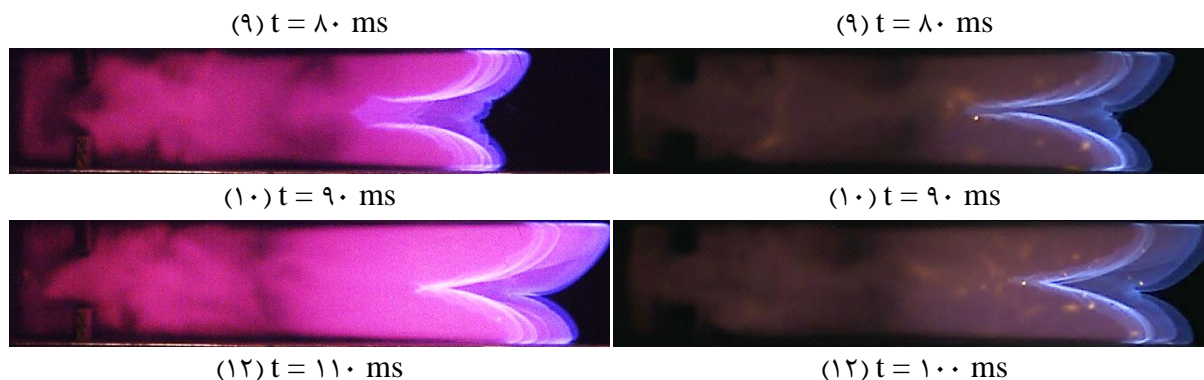
شکل ۳-۴- تصویر جبهه شعله با حضور مانع متخلخل و صلب را برای حالت ۱ نشان می‌دهد. اثر مانع‌ها از قسمت ۳ شکل قابل‌مشاهده است. مانع متخلخل اجازه عبور مقداری از جریان احتراق را از میان خود می‌دهد در صورتی که مانع صلب این‌گونه نبوده و جریان گردابه‌ای کاملی را موجب می‌شود و تفاوت اثر این دو نوع مانع بر انتشار شعله در قسمت ۴ شکل به‌وضوح دیده می‌شود. در این حالت

دینامیک انتشار شعله از نظر سرعت جبهه و موقعیت مکانی تخت شدن جبهه شعله و آغاز برگشت جبهه، تفاوت بسیار کمی با حالت بدون حضور مانع دارد.

مانع صلب (حالت ۱)

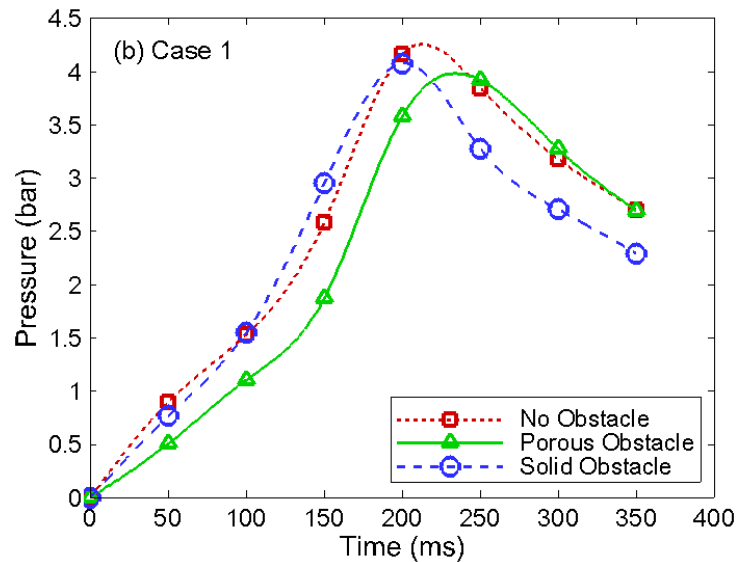
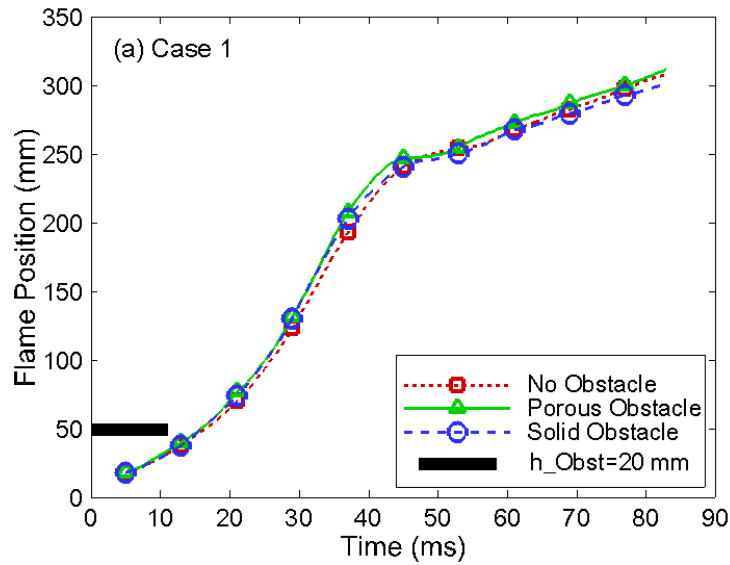
مانع متخلخل (حالت ۱)





شکل ۴-۴- تصویر شعله مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا در محفظه بسته با حضور مانع متخلخل و صلب (حالت ۱)

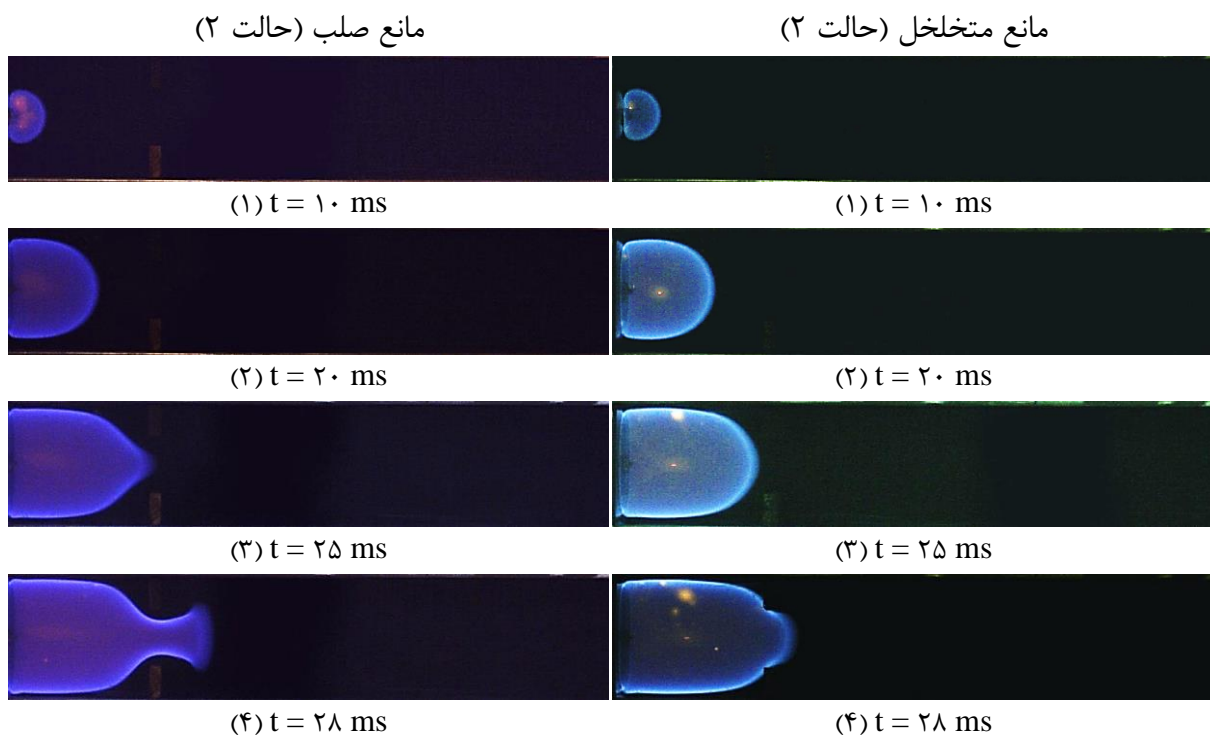
تخت شدن جبهه شعله برای مانع صلب در زمان ۴۸ ms و موقعیت مکانی ۲۴۶ mm و برای مانع متخلخل در زمان ۴۶ ms و موقعیت مکانی ۲۴۸ mm رخ داده است. در ادامه شعله گل لاله در حدود زمان ۱۰۰ ms شکل گرفته است. شکل ۴-۵ موقعیت مکانی شعله و تغییرات فشار داخل محفظه بر حسب زمان با دو نوع مانع به همراه حالت بدون حضور مانع را نشان داده است. همان‌طور که در قسمت a شکل ۴-۵ دیده می‌شود تفاوت چندانی بین سه حالت مختلف قابل مشاهده نیست و دلیل آن می‌تواند سرعت کم جبهه شعله در هنگام برخورد با مانع باشد که موقعیت نسبتاً نزدیکی را به محل ایجاد جرقه دارد. قسمت b شکل ۴-۵ تغییرات فشار داخل محفظه را برای سه حالت مختلف نشان داده است. نتایج نزدیک به هم بوده و مقدار حداکثر فشار در حدود زمان ۲۰۰ ms رخ داده است. البته حداکثر فشار در داخل محفظه نسبت به حالت بدون حضور مانع، برای مانع‌های متخلخل و صلب به ترتیب ۶ و ۲ در صد کاهش داشته است.

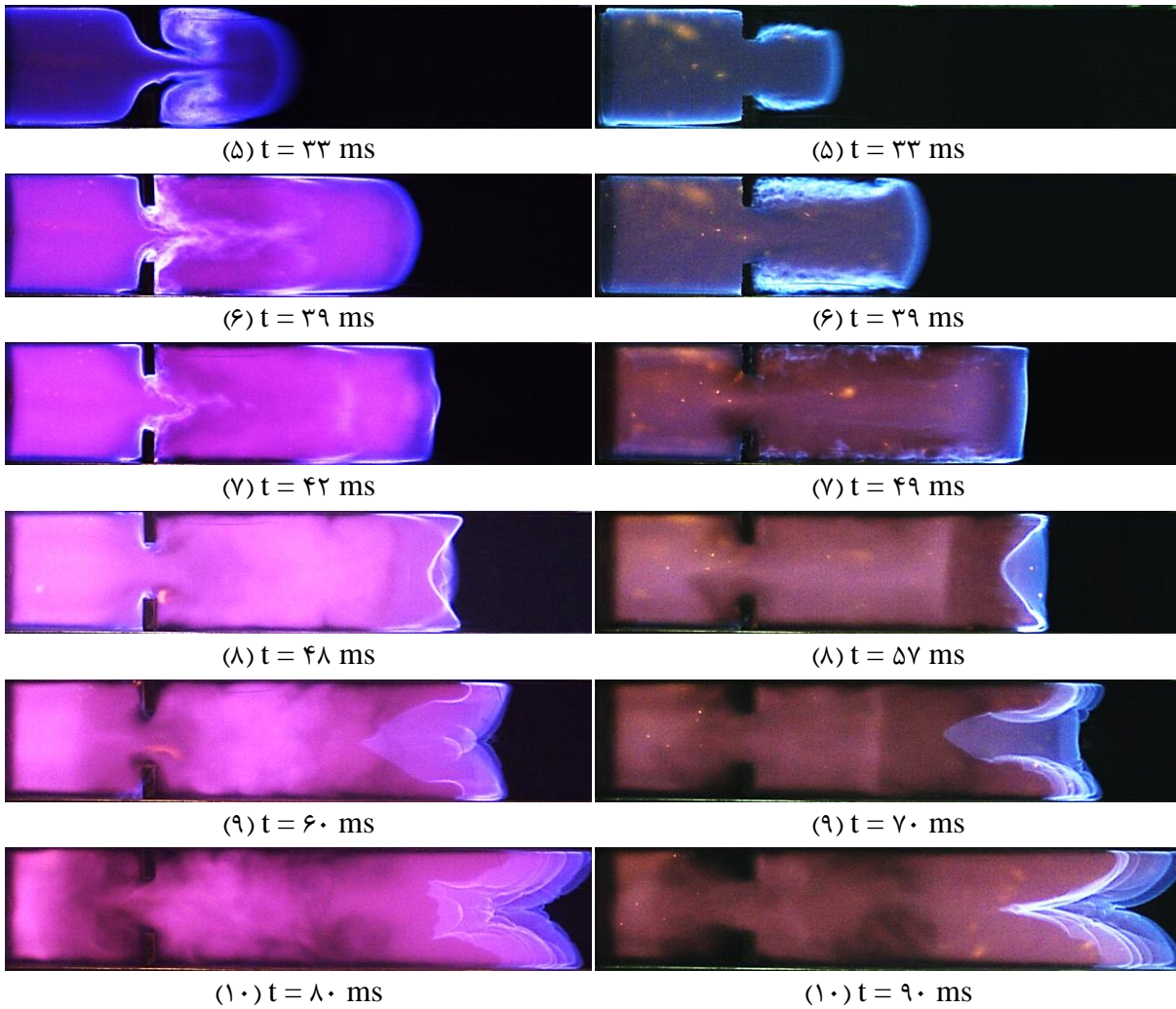


شکل ۴-۵ (a) موقعیت مکانی شعله و (b) تغییرات فشار داخل محفظه نسبت به زمان برای مانع متخلخل و صلب (حالت ۱)

شکل ۴-۶ تصویر جبهه شعله با حضور مانع متخلخل و صلب را برای حالت ۲ نشان می‌دهد. اثر مانع‌ها از قسمت ۴ شکل قابل مشاهده است. همانند حالت قبل دیده می‌شود که مانع متخلخل اجازه عبور مقداری از جریان احتراق را از میان خود می‌دهد در صورتی که مانع صلب این گونه نبوده و جریان گردابه‌ای شدیدی را موجب شده است. جریان گردابه‌ای ایجاد شده در قسمت ۵ شکل به وضوح دیده می‌شود. در این حالت دینامیک انتشار شعله از نظر سرعت جبهه شعله و موقعیت مکانی تخت شدن جبهه شعله و آغاز برگشت جبهه، تغییرات اساسی داشته است. مانع صلب گردابه و در نتیجه آشفستگی

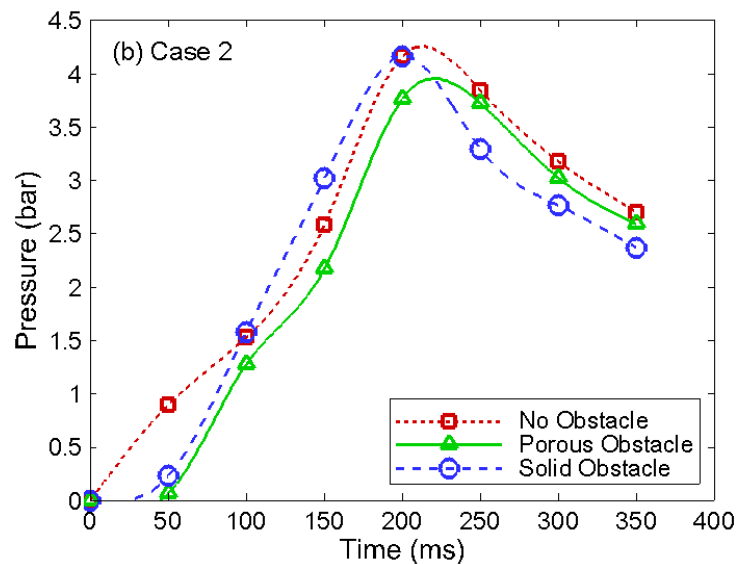
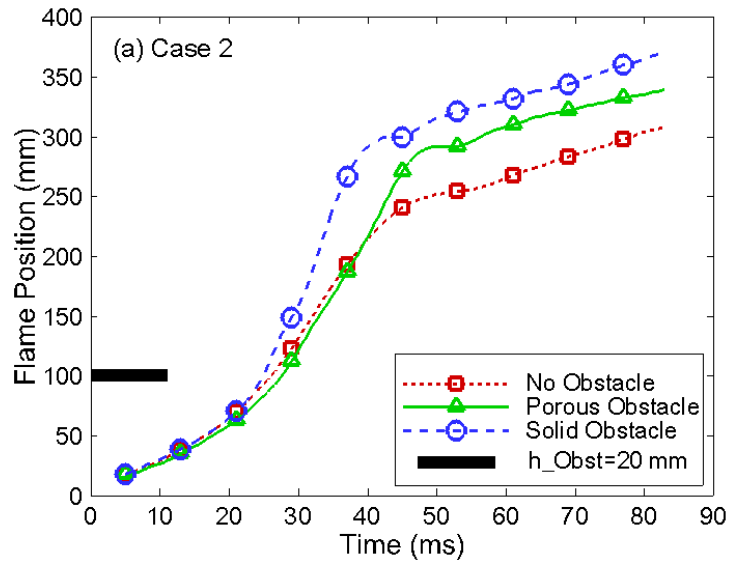
شدیدتری نسبت به مانع متخلخل در میدان ایجاد کرده است. در قسمت ۶ و ۷ شکل ۴-۶ برای مانع صلب موج ضربه‌ای ایجاد شده در نزدیکی دیواره بالا و پایین دیده می‌شود در صورتی که برای مانع صلب موج ضربه‌ای ایجاد نشده است. با دقت به زمان قسمت‌های ۶، ۷ و ۸ شکل ۴-۶ برای دو حالت مانع، آشفتگی ایجاد شده در حالت مانع صلب، موجب افزایش سرعت پیشروی جبهه شعله شده است و البته این افزایش سرعت جبهه در نمودار شکل ۴-۷ قسمت a به وضوح دیده می‌شود. تخت شدن جبهه شعله برای مانع صلب در زمان ۴۲ ms و موقعیت مکانی ۳۰۰ mm و برای مانع متخلخل در زمان ۴۹ ms و موقعیت مکانی ۲۹۱ mm رخ داده است. موج ضربه‌ای ایجاد شده در حالت مانع صلب، در قسمت ۹ شکل ۴-۶ مربوطه در مرکز جبهه شعله نیز به وضوح دیده می‌شود که موجب لایه لایه شدن جبهه شعله شده که در قسمت ۱۰ شکل ۴-۶ دیده می‌شود در حالی که برای حالت مانع متخلخل این گونه نیست. در ادامه شعله گل لاله برای مانع متخلخل در حدود زمان ۹۰ ms و برای مانع صلب در حدود زمان ۸۰ ms شکل گرفته است.





شکل ۴-۶- تصویر شعله مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا در محفظه بسته با حضور مانع متخلخل و صلب (حالت ۲)

شکل ۴-۷- موقعیت مکانی شعله و تغییرات فشار داخل محفظه را برحسب زمان برای حالت ۲ با دو نوع مانع به همراه حالت بدون حضور مانع را نشان داده است. با توجه به نمودار موقعیت مکانی جبهه نسبت به زمان که در قسمت a شکل ۴-۷ دیده می‌شود مانع متخلخل موقعیت مکانی شروع برگشت جبهه شعله یا همان تخت شدن جبهه شعله را از نظر مکانی (موقعیت مکانی تخت شدن جبهه شعله برابر ۲۹۱ mm) نسبت به حالت بدون مانع عقب انداخته است ولی زمان وقوع آن (در زمان ۴۹ ms) تغییری نداشته است و در واقع در این حالت مانع متخلخل به بقای شتاب ایجادشده در شعله برای زمان بیشتری کمک کرده است.



شکل ۴-۷ (a) موقعیت مکانی شعله و (b) تغییرات فشار داخل محفظه نسبت به زمان برای مانع متخلخل و صلب (حالت ۲)

در مانع صلب با عبور جبهه شعله از روی مانع شتاب جبهه شعله و سرعت آن افزایش پیدا کرده است و تخت شدن جبهه شعله با طی فاصله بیشتری (موقعیت مکانی تخت شدن جبهه شعله برابر ۳۰۰ mm) و البته در زمان کوتاه‌تری (در زمان ۴۲ ms) رخ داده است.

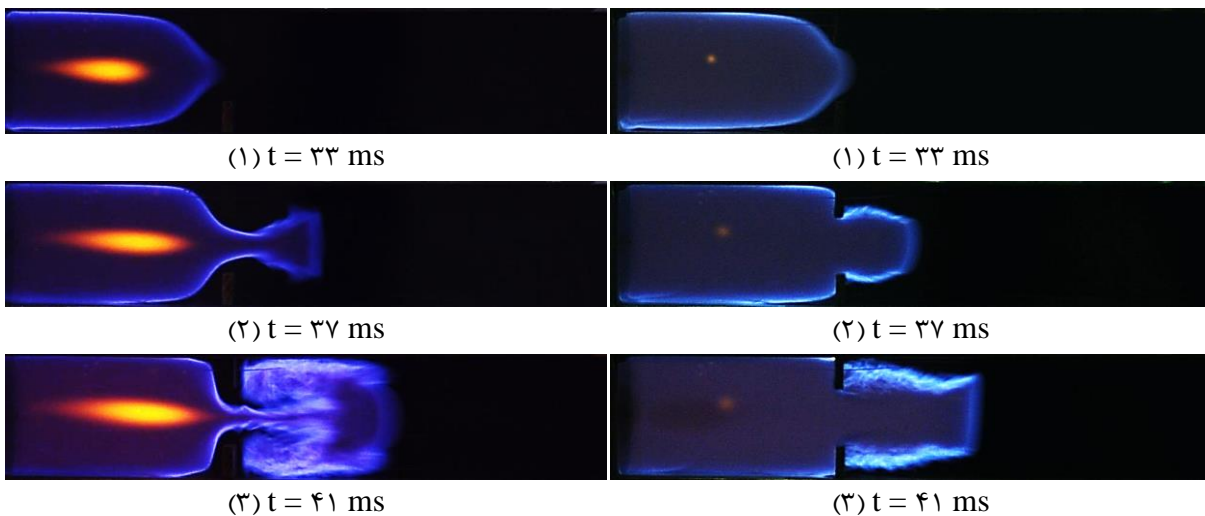
قسمت b شکل ۴-۷ تغییرات فشار داخل محفظه را برای سه حالت مختلف نشان داده است. نتایج نزدیک به هم بوده و مقدار حداکثر فشار در حدود زمان ۲۰۰ ms رخ داده است. البته حداکثر فشار در

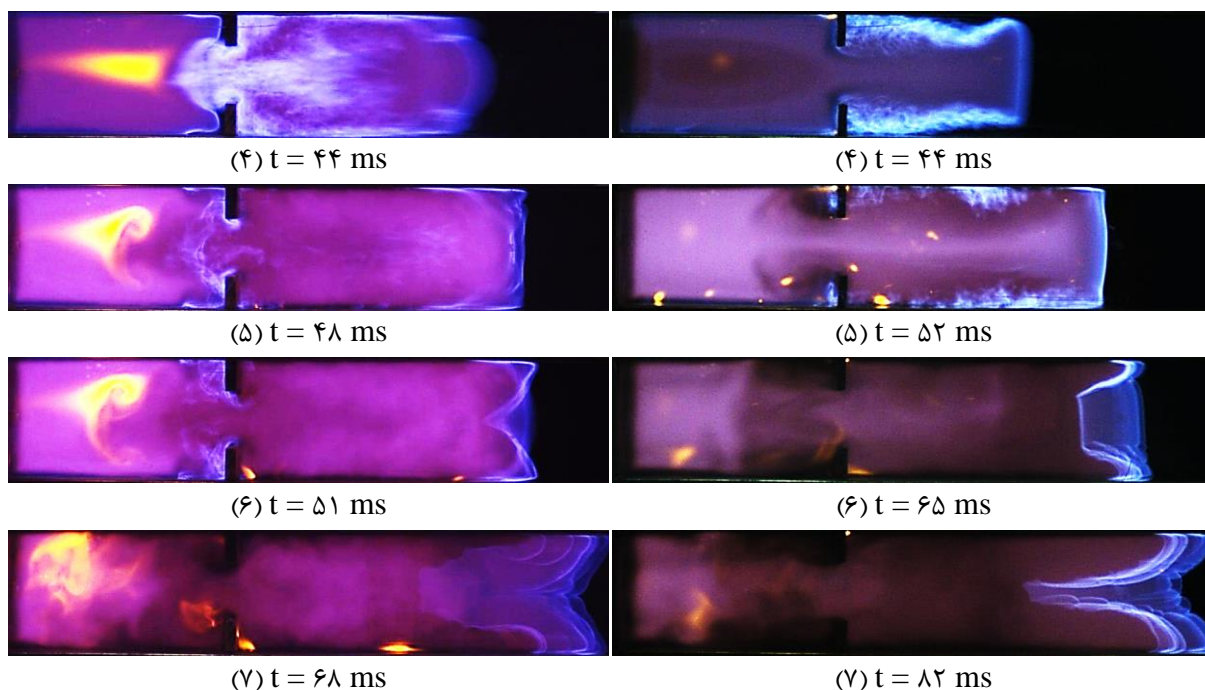
داخل محفظه نسبت به حالت بدون حضور مانع، برای مانع‌های متخلخل و صلب به ترتیب ۹ و ۰.۲ در صد کاهش داشته است.

شکل ۴-۸ تصویر جبهه شعله با حضور مانع متخلخل و صلب را برای حالت ۳ نشان می‌دهد. اثر مانع‌ها از قسمت ۲ شکل قابل مشاهده است. آشفته‌گی ایجادشده در این حالت شدیدتر از حالت قبل بوده و آغاز ایجاد آشفته‌گی و جریان گردابه‌ای شدید در میدان جریان احتراقی از قسمت ۳ شکل ۴-۸ قابل مشاهده است. در قسمت‌های ۳ و ۴ شکل ۴-۸ تفاوت بین دو نوع مانع متخلخل و صلب به وضوح دیده شده و برای مانع صلب موج فشاری قوی ایجادشده در جلو جبهه قابل مشاهده است. یک نکته قابل توجه در قسمت شماره ۵ و ۶ شکل ۴-۸ جریان برگشتی نسبتاً قوی‌تر و البته منظم در مانع متخلخل است که به صورت یک جریان رو به عقب گردابه‌ای منظم در شکل قابل مشاهده است در صورتی که در مانع صلب باینکه آشفته‌گی ایجادشده در آن شدیدتر است جریان برگشتی نسبتاً ضعیفی ایجادشده است. تخت شدن جبهه شعله برای مانع صلب در زمان ۴۸ ms و موقعیت مکانی ۳۴۰ mm و برای مانع متخلخل در زمان ۵۲ ms و موقعیت مکانی ۳۲۶ mm رخ داده است. موج ضربه‌ای ایجادشده در حالت مانع صلب در لحظه تخت شدن جبهه با آن برخورد کرده و در ادامه ساختار جبهه شعله را یکنواخت‌تر از حالت مانع متخلخل کرده است که در قسمت ۷ شکل ۴-۸ دیده می‌شود.

مانع صلب (حالت ۳)

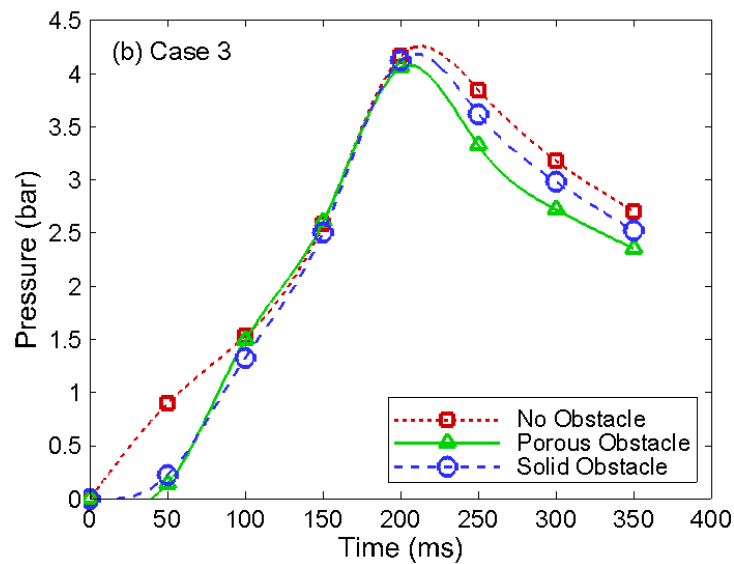
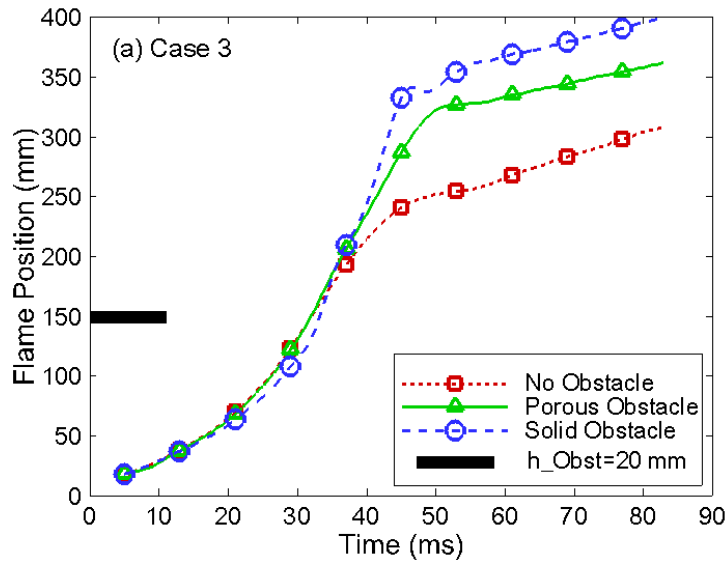
مانع متخلخل (حالت ۳)





شکل ۴-۸- تصویر شعله مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا در محفظه بسته با حضور مانع متخلخل و صلب (حالت ۳)

شکل ۴-۹ موقعیت مکانی شعله و تغییرات فشار داخل محفظه را برحسب زمان، برای حالت ۳ با دو نوع مانع به همراه حالت بدون حضور مانع را نشان داده است. با توجه به نمودار موقعیت مکانی جبهه نسبت به زمان که در قسمت a شکل ۴-۹ دیده می‌شود مانع متخلخل موقعیت مکانی شروع برگشت جبهه شعله یا همان تخت شدن جبهه شعله را از نظر مکانی (موقعیت مکانی تخت شدن جبهه شعله برابر ۳۲۶ mm) نسبت به حالت بدون مانع عقب انداخته است و زمان وقوع آن (در زمان ۵۲ ms) مقدار کمی تغییر داشته است. در مانع صلب شتاب جبهه شعله و سرعت آن افزایش پیدا کرده است و تخت شدن جبهه شعله با طی فاصله بیشتری (موقعیت مکانی تخت شدن جبهه شعله برابر ۳۴۰ mm) و البته در زمان مشابه با حالت بدون حضور مانع (در زمان ۴۸ ms) رخ داده است. قسمت b شکل ۴-۹ تغییرات فشار داخل محفظه را برای سه حالت مختلف نشان داده است. نتایج نزدیک به هم بوده و مقدار حداکثر فشار در حدود زمان ۲۰۰ ms رخ داده است.

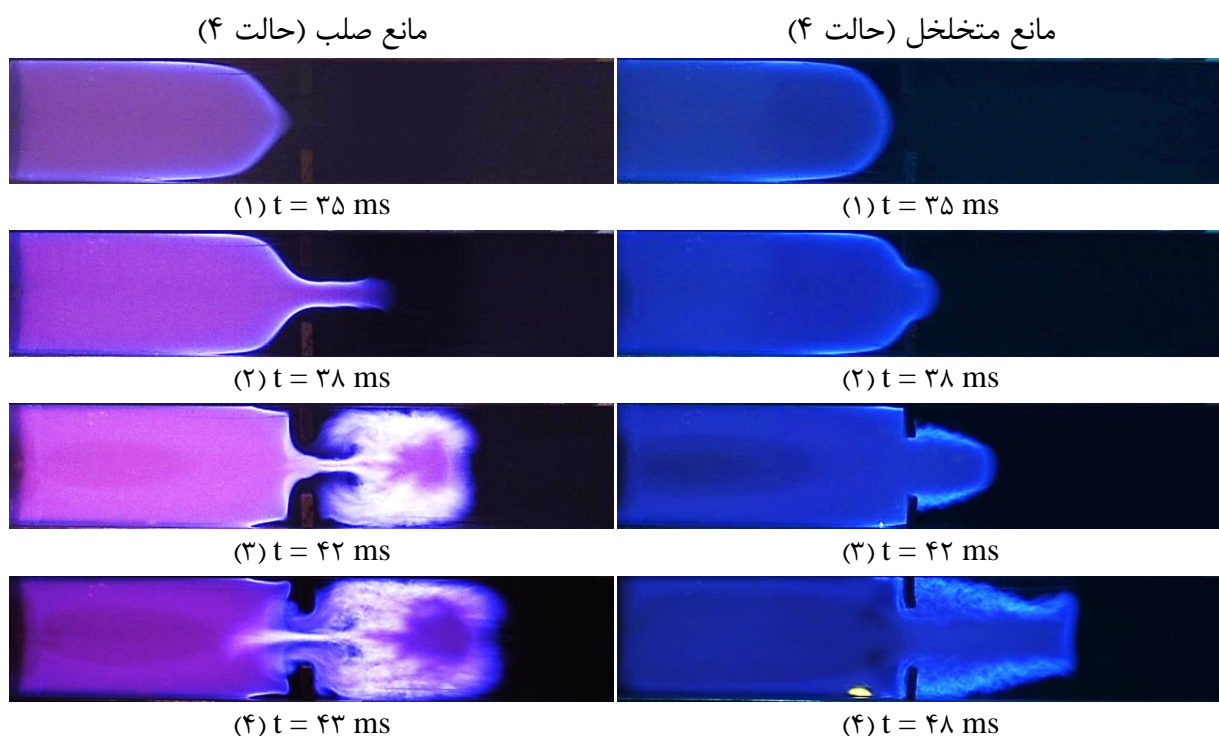


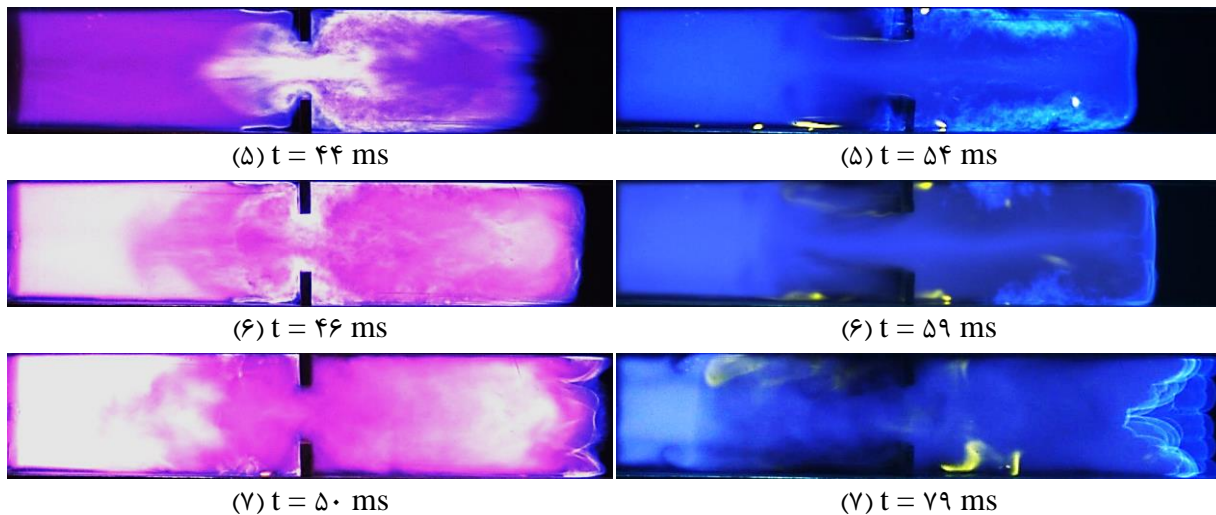
شکل ۴-۹ (a) موقعیت مکانی شعله و (b) تغییرات فشار در داخل محفظه نسبت به زمان برای مانع متخلخل و صلب (حالت ۳)

البته حداکثر فشار در داخل محفظه نسبت به حالت بدون حضور مانع، برای مانع‌های متخلخل و صلب به ترتیب ۳ و ۱ درصد کاهش داشته است.

شکل ۴-۱۰ تصویر جبهه شعله با حضور مانع متخلخل و صلب را برای حالت ۴ نشان می‌دهد. اثر مانع‌ها از قسمت ۲ شکل قابل مشاهده است. این حالت در بین تمامی حالت‌ها دارای شدیدترین آشفته‌گی ایجادشده در میدان جریان است. قسمت ۳ شکل ۴-۱۰ میزان شدت آشفته‌گی برای مانع صلب را نیز نشان می‌دهد البته برای مانع متخلخل نیز با توجه به اجازه عبور مقداری از جریان از محیط متخلخل

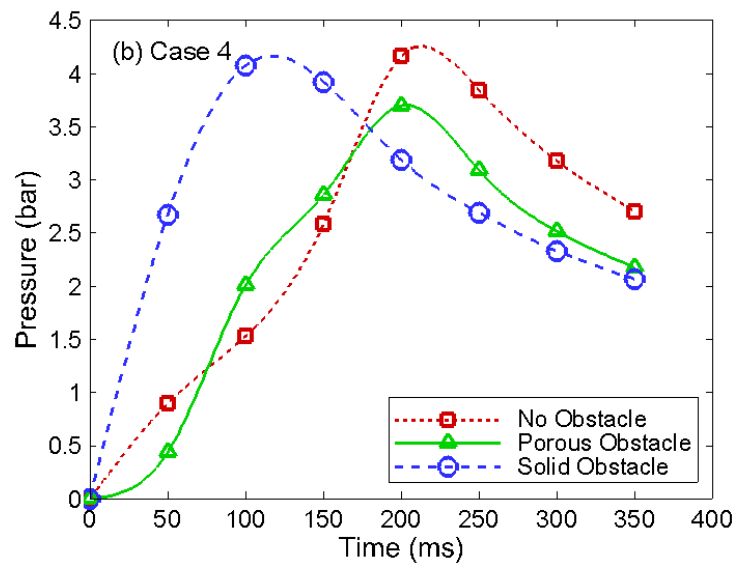
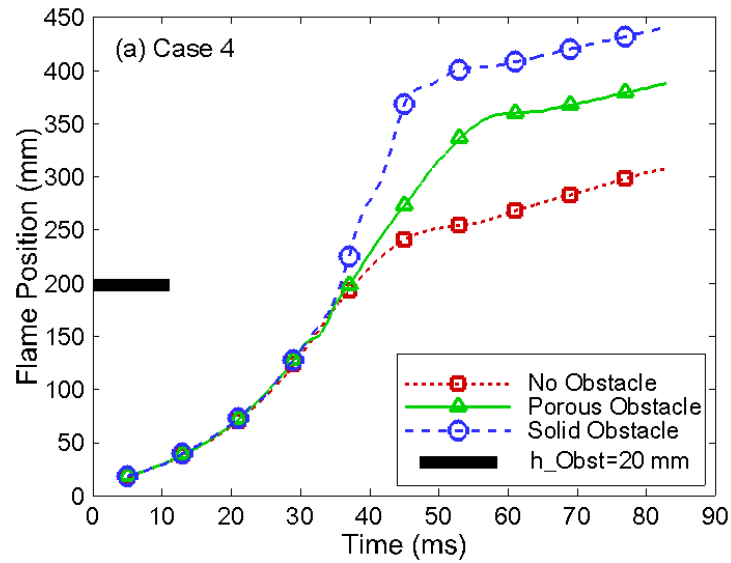
همان‌طور که مشاهده می‌شود میدان جریان دارای به‌هم‌ریختگی و آشفتگی کمتری نسبت به مانع صلب است. در قسمت‌های ۳ و ۴ و ۵ شکل ۴-۱۰ تفاوت بین دو نوع مانع متخلخل و صلب به‌وضوح دیده می‌شود. در این حالت نیز برای مانع صلب موج فشاری قوی‌تری نسبت به حالت قبل ایجاد شده است و ساختار جبهه شعله کاملاً متفاوت شده است. همانند حالت ۳ در این حالت نیز در قسمت شماره ۵ و ۶ و ۷ شکل ۴-۱۰ جریان برگشتی نسبتاً قوی‌تری در مانع متخلخل ایجاد شده است که به‌صورت گردابه‌ای منظم در شکل قابل مشاهده است. همانند حالت قبل در مانع صلب باوجود آشفتگی ایجاد شده قوی‌تر از حالت ۳، جریان برگشتی نسبتاً ضعیفی ایجاد شده است. تخت شدن جبهه شعله برای مانع صلب در زمان ۴۶ ms و موقعیت مکانی ۳۸۳ mm و برای مانع متخلخل در زمان ۵۹ ms و موقعیت مکانی ۳۵۹ mm رخ داده است. در انتها ساختار جبهه شعله که در قسمت ۷ شکل ۴-۱۰ دیده می‌شود کاملاً متفاوت شده که برای مانع صلب موج فشاری شدیداً آن را تحت تأثیر قرار داده‌اند و برای مانع متخلخل ساختار آن دندان‌دندانه شده است.





شکل ۴-۱۰- تصویر شعله مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا در محفظه بسته با حضور مانع متخلخل و صلب (حالت ۴)

شکل ۴-۱۱ موقعیت مکانی شعله و تغییرات فشار داخل محفظه را برحسب زمان، برای حالت ۴ با دو نوع مانع به همراه حالت بدون حضور مانع را نشان داده است. با توجه به نمودار موقعیت مکانی جبهه نسبت به زمان که در قسمت a شکل ۴-۱۱ دیده می‌شود مانع متخلخل موقعیت مکانی شروع برگشت جبهه شعله یا همان تخت شدن جبهه شعله را از نظر مکانی (موقعیت مکانی تخت شدن جبهه شعله برابر ۳۵۹ mm) نسبت به حالت بدون مانع عقب انداخته است و زمان وقوع آن (در زمان ۵۹ ms) به تأخیر افتاده است. در مانع صلب شتاب جبهه شعله و سرعت آن هم‌زمان با عبور جبهه شعله از روی مانع به شدت افزایش پیدا کرده است و تخت شدن جبهه شعله با طی فاصله بیشتری (موقعیت مکانی تخت شدن جبهه شعله برابر ۳۸۳ mm) و در زمان کوتاه‌تری نسبت به حالت بدون حضور مانع (در زمان ۴۶ ms) رخ داده است. قسمت b شکل ۴-۱۱ تغییرات فشار داخل محفظه را برای سه حالت مختلف نشان داده است. نتایج متفاوت بوده و مقدار حداکثر فشار برای مانع متخلخل در حدود زمان ۲۰۰ ms و برای مانع صلب در حدود زمان ۱۰۰ ms رخ داده است. حداکثر فشار در داخل محفظه نسبت به حالت بدون حضور مانع، برای مانع‌های متخلخل و صلب به ترتیب ۱۲ و ۲ درصد کاهش داشته است.

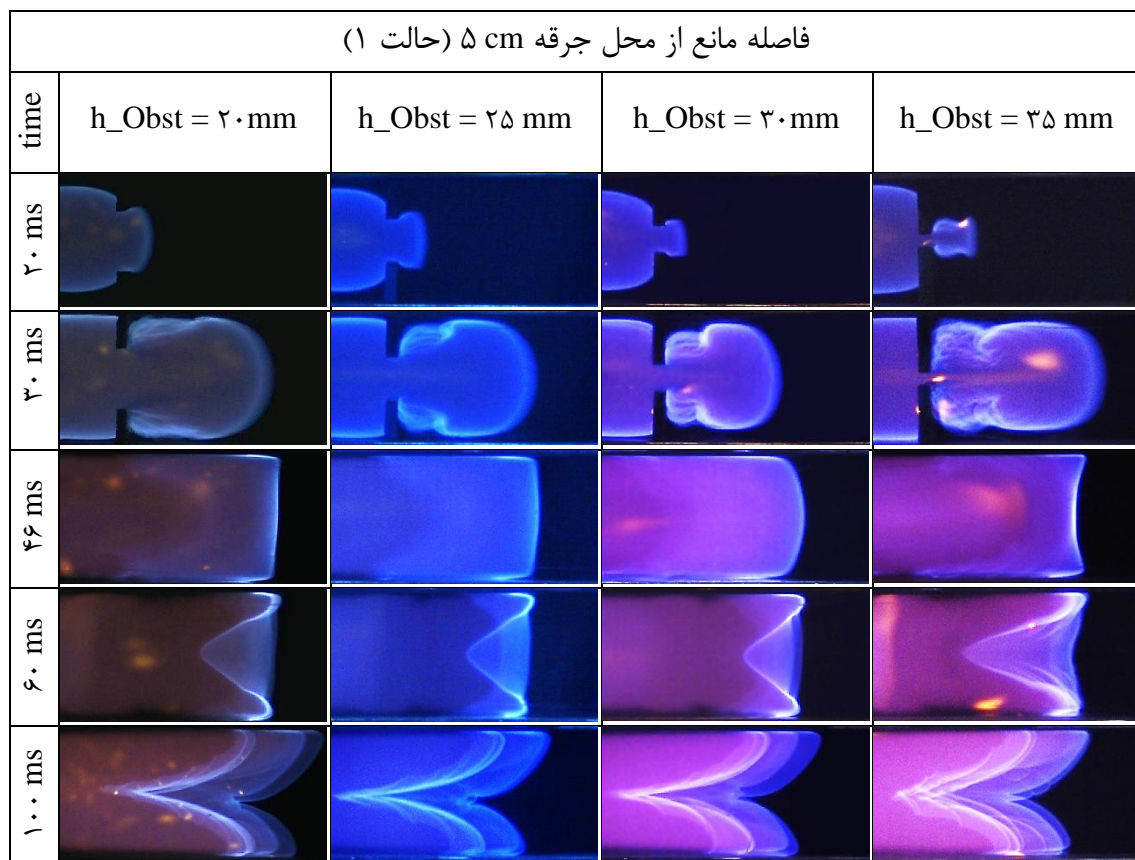


شکل ۴-۱۱ (a) موقعیت مکانی شعله و (b) تغییرات فشار در داخل محفظه نسبت به زمان برای مانع متخلخل و صلب (حالت ۴)

۴-۴- رفتار شعله در اثر تغییر ارتفاع مانع متخلخل

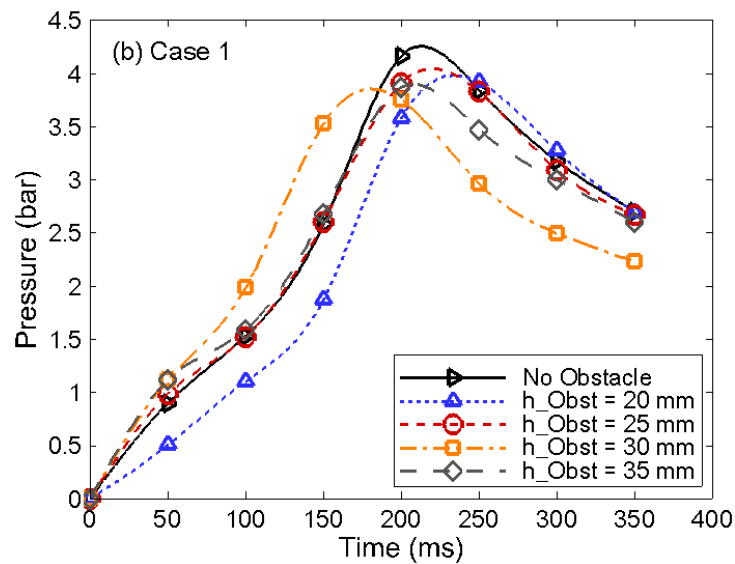
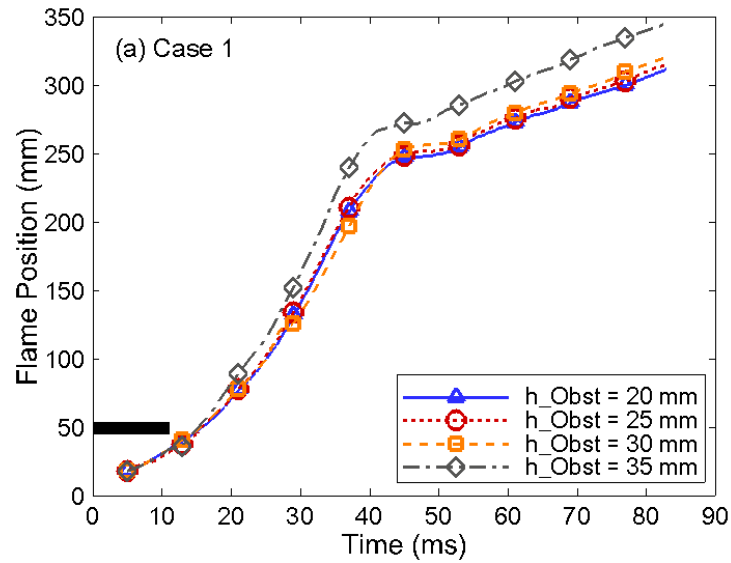
در این بخش از مطالعه آزمایشگاهی، تأثیر ارتفاع مانع متخلخل که به اختصار (h_{Obst}) تعریف شده است برای چهار ارتفاع متفاوت ($h_{Obst} = 20 \text{ mm}, 25 \text{ mm}, 30 \text{ mm}, 35 \text{ mm}$) با چهار فاصله متفاوت از محل ایجاد ($5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}, 15 \text{ cm}, 20 \text{ cm}$) جرقه بررسی شده است. به دلیل حجم زیاد حالت‌ها تصویر کامل آنها در پیوست ا- تا پیوست ل- آورده شده است.

شکل ۴-۱۲ تصویر جبهه شعله برای حالت ۱ را نشان می‌دهد که برای ارتفاع‌های مختلف مانع و در زمان‌های مختلف در کنار هم نمایش داده شده است. در این حالت با توجه به نزدیک بودن مانع به محل ایجاد جرقه، در زمان برخورد با مانع سرعت جبهه شعله نسبتاً مقدار کمی داشته و تأثیر ارتفاع مانع چندان محسوس نیست. تنها در حالت $h_{\text{Obst}} = 35 \text{ mm}$ مقداری تفاوت در سرعت شعله که افزایش پیدا کرده است و ساختار نهایی جبهه شعله قابل مشاهده است.



شکل ۴-۱۲- تصویر شعله با حضور مانع متخلخل برای $h_{\text{Obst}} = 20 \text{ mm}, 25 \text{ mm}, 30 \text{ mm}, 35 \text{ mm}$ (حالت ۱)

شکل ۴-۱۳ موقعیت مکانی شعله و تغییرات فشار داخل محفظه را برحسب زمان، برای حالت ۱ با چهار ارتفاع مختلف برای مانع متخلخل را نشان داده است. با توجه به نمودار موقعیت مکانی جبهه نسبت به زمان که در قسمت a شکل ۴-۱۳ دیده می‌شود، ارتفاع مانع برای این حالت تنها در اندازه $h_{\text{Obst}} = 35 \text{ mm}$ سرعت جبهه شعله و موقعیت مکانی شروع برگشت جبهه شعله را تغییر داده است و اندازه‌های دیگر مانع تأثیر متفاوتی بر انتشار شعله نداشته است.

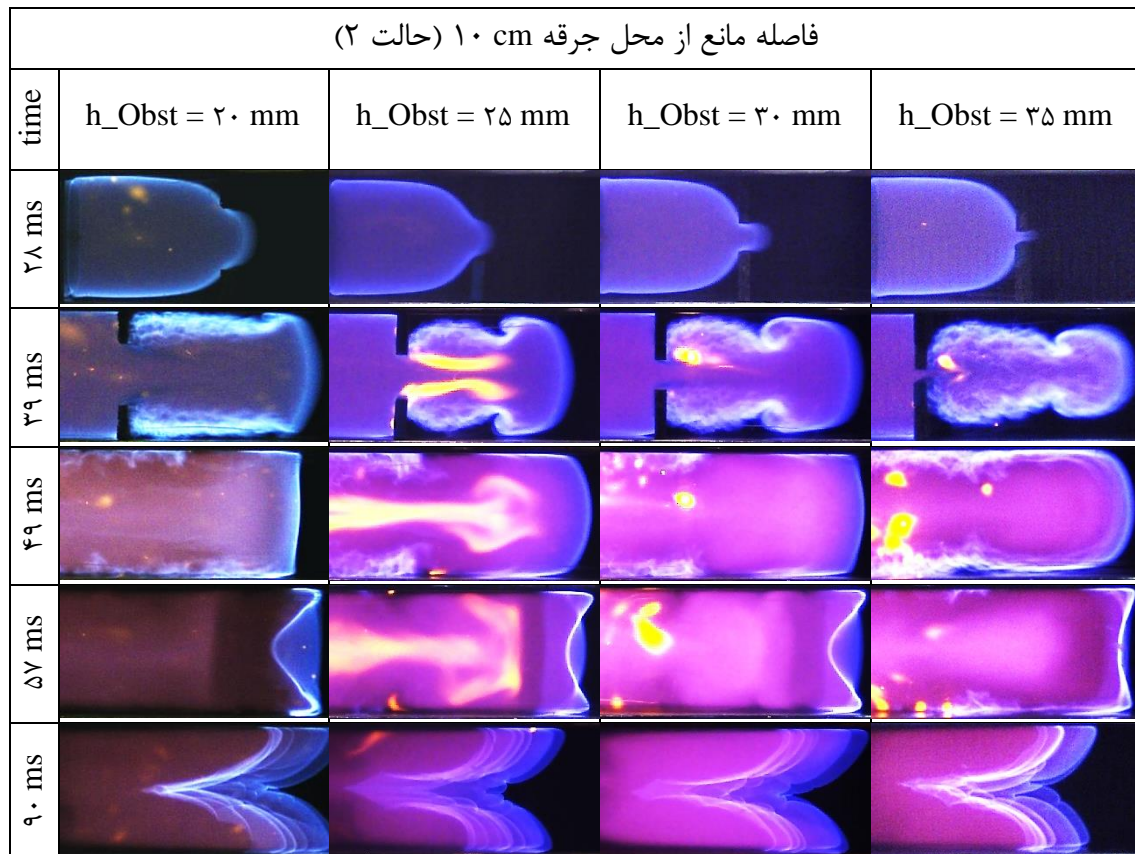


شکل ۴-۱۳- (a) موقعیت مکانی شعله و (b) تغییرات فشار با حضور مانع متخلخل با h_{Obst} متفاوت (حالت ۱)

موقعیت مکانی تخت شدن جبهه شعله برای سه اندازه $h_{Obst} = 20 \text{ mm}$, 25 mm , 30 mm در حدود زمان 46 ms و موقعیت مکانی 248 mm بوده و برای $h_{Obst} = 35 \text{ mm}$ در زمان 46 ms و موقعیت مکانی 272 mm رخ داده است. از نظر زمانی تخت شدن جبهه شعله در یک زمان رخ داده است. قسمت b شکل ۴-۱۳ تغییرات فشار داخل محفظه را برای پنج حالت مختلف نشان داده است. نتایج مقدراری متفاوت بوده و اندازه حداکثر فشار در داخل محفظه نسبت به حالت بدون حضور مانع، به ترتیب

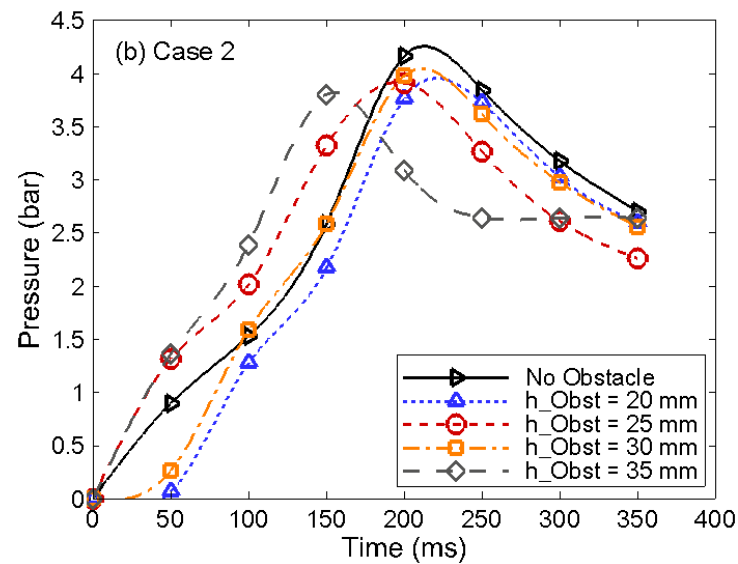
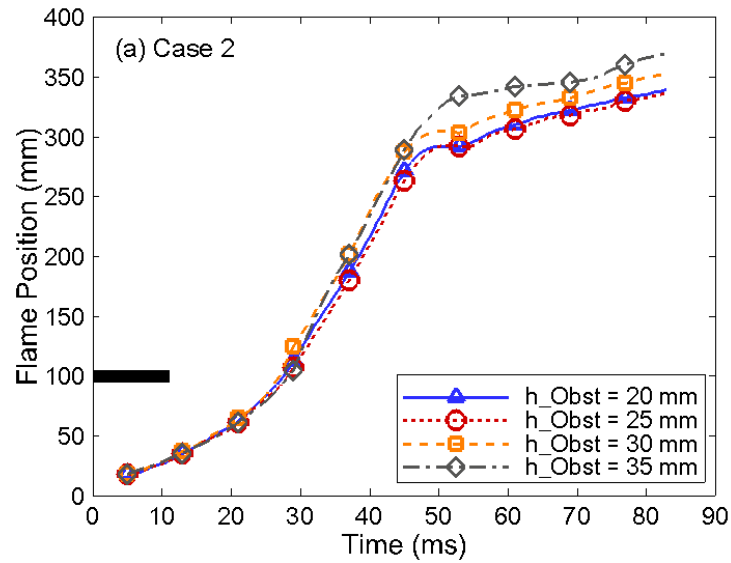
اندازه ارتفاع مانع از کوچک به بزرگ ۶، ۶.۵، ۱۱، ۸ در صد کاهش داشته است. مقدار حداکثر فشار برای مانع‌ها در حدود زمان ۲۰۰ ms رخ داده است.

شکل ۴-۱۴ تصویر جبهه شعله برای حالت ۲ را نشان می‌دهد که برای ارتفاع‌های مختلف مانع و در زمان‌های مختلف در کنار هم نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱۴- تصویر شعله با حضور مانع متخلخل برای $h_{\text{Obst}} = 20 \text{ mm}, 25 \text{ mm}, 30 \text{ mm}, 35 \text{ mm}$ (حالت ۲)

در این حالت تفاوت محسوس بین مانع‌های مختلف در زمان ۳۹ ms شکل ۴-۱۴ دیده می‌شود که با افزایش ارتفاع مانع، شدت آشفستگی و سرعت نفوذ شعله به داخل مخلوط نسوخته با عبور از مانع افزایش پیدا کرده است. همچنین با توجه به زمان ۴۹ ms شکل ۴-۱۴ با افزایش ارتفاع مانع فرآیند تخت شدن شعله به تأخیر افتاده است. با توجه به قسمت a شکل ۴-۱۵ که موقعیت مکانی جبهه شعله را برای حالت ۲ برحسب زمان برای چهار ارتفاع مختلف مانع را نشان می‌دهد، بین مانع ۲۰ و ۲۵

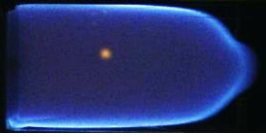



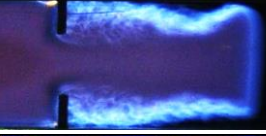
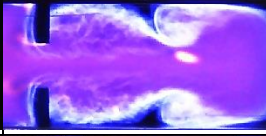
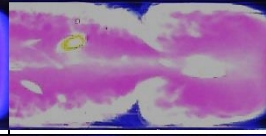









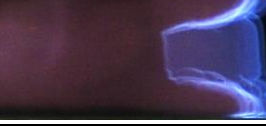


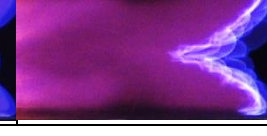


شکل ۴-۱۵ (a) موقعیت مکانی شعله و (b) تغییرات فشار با حضور مانع متخلخل با h_{Obst} متفاوت (حالت ۲)

تفاوتی قابل توجهی از نظر سرعت و شتاب شعله وجود نداشته (موقعیت مکانی تخت شدن جبهه شعله برابر ۲۹۱ mm و زمان ۵۱ ms) و در مانع ۳۰ mm مقداری موقعیت تخت شدن شعله از نظر مکانی به تأخیر افتاده (موقعیت مکانی تخت شدن جبهه شعله برابر ۳۰۴ mm و زمان ۵۰ ms) و در حالت مانع با ارتفاع ۳۵ mm به عقب افتادن شرایط وارونگی بیشتر شده است (موقعیت مکانی تخت شدن جبهه شعله برابر ۳۳۵ mm و زمان ۵۴ ms). قسمت b شکل ۴-۱۵ تغییرات فشار داخل محفظه را برای حالت ۲ برای چهار ارتفاع مختلف مانع را نشان داده است. نتایج مقداری متفاوت بوده و اندازه حداکثر فشار

در داخل محفظه نسبت به حالت بدون حضور مانع، به ترتیب اندازه ارتفاع مانع از کوچک به بزرگ ۹، ۶، ۵، ۹ در صد کاهش داشته است. مقدار حداکثر فشار برای مانع‌ها در حدود زمان ۲۰۰ ms به جز مانع با ارتفاع ۳۵ mm که در حدود زمان ۱۵۰ ms رخ داده است.

شکل ۴-۱۶ تصویر جبهه شعله برای حالت ۳ را نشان می‌دهد که برای ارتفاع‌های مختلف مانع و در زمان‌های مختلف در کنار هم نمایش داده شده است. در زمان ۳۳ ms شکل ۴-۱۶ که لحظه برخورد جبهه شعله با مانع متخلخل است، تفاوت بین مانع‌های مختلف و در واقع حالت جت شدن جبهه احتراق که به داخل مخلوط نسوخته نفوذ کرده است با افزایش ارتفاع مانع شدت گرفته است. افزایش سرعت جبهه احتراق و تشدید آشفته‌گی میدان جریان احتراق نسبت به افزایش ارتفاع مانع در زمان ۴۴ ms شکل ۴-۱۶ به وضوح دیده می‌شود.

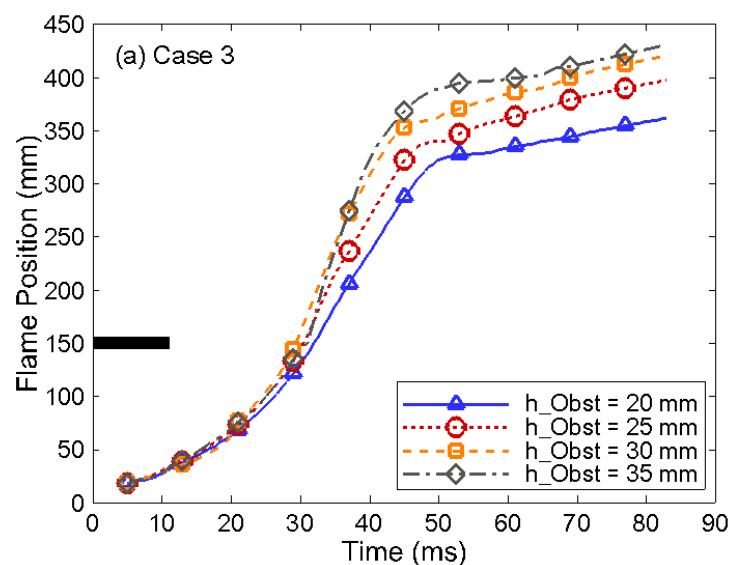
فاصله مانع از محل جرقه ۱۵ cm (حالت ۳)				
time	$h_{\text{Obst}} = 20 \text{ mm}$	$h_{\text{Obst}} = 25 \text{ mm}$	$h_{\text{Obst}} = 30 \text{ mm}$	$h_{\text{Obst}} = 35 \text{ mm}$
۳۳ ms				
۴۴ ms				
۵۲ ms				
۶۵ ms				
۷۰ ms				

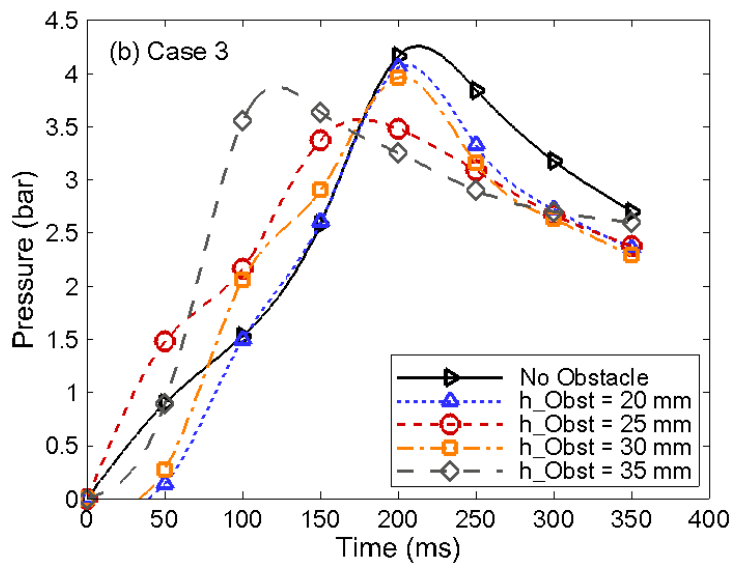
شکل ۴-۱۶- تصویر شعله با حضور مانع متخلخل برای $h_{\text{Obst}} = 20 \text{ mm}, 25 \text{ mm}, 30 \text{ mm}, 35 \text{ mm}$ (حالت ۳)

البته با دقت به زمان ۵۲ ms شکل ۴-۱۶ زمان تخت شدن جبهه شعله چندان تغییری نداشته است. ساختار نهایی جبهه شعله نیز در زمان ۷۰ ms شکل ۴-۱۶ نشان داده شده که با افزایش ارتفاع مانع جبهه شعله شبکه‌ای تر شده است.

شکل ۴-۱۷ موقعیت مکانی شعله و تغییرات فشار داخل محفظه را برحسب زمان، برای حالت ۳ و چهار ارتفاع مختلف مانع را نشان داده است. با توجه به نمودار موقعیت مکانی جبهه نسبت به زمان که در قسمت a شکل ۴-۱۷ دیده می‌شود، سرعت جبهه شعله در مراحل اولیه رشد با افزایش ارتفاع مانع افزایش داشته و موقعیت مکانی تخت شدن جبهه شعله از نظر مکانی عقب‌افتاده است. موقعیت مکانی تخت شدن جبهه شعله به ترتیب ارتفاع مانع از کوچک به بزرگ برابر ۳۲۶ mm، ۳۴۰ mm، ۳۵۹ mm و ۳۹۵ mm و در زمان ۴۹ ms، ۵۲ ms، ۴۷ ms و ۵۳ ms رخ داده است.

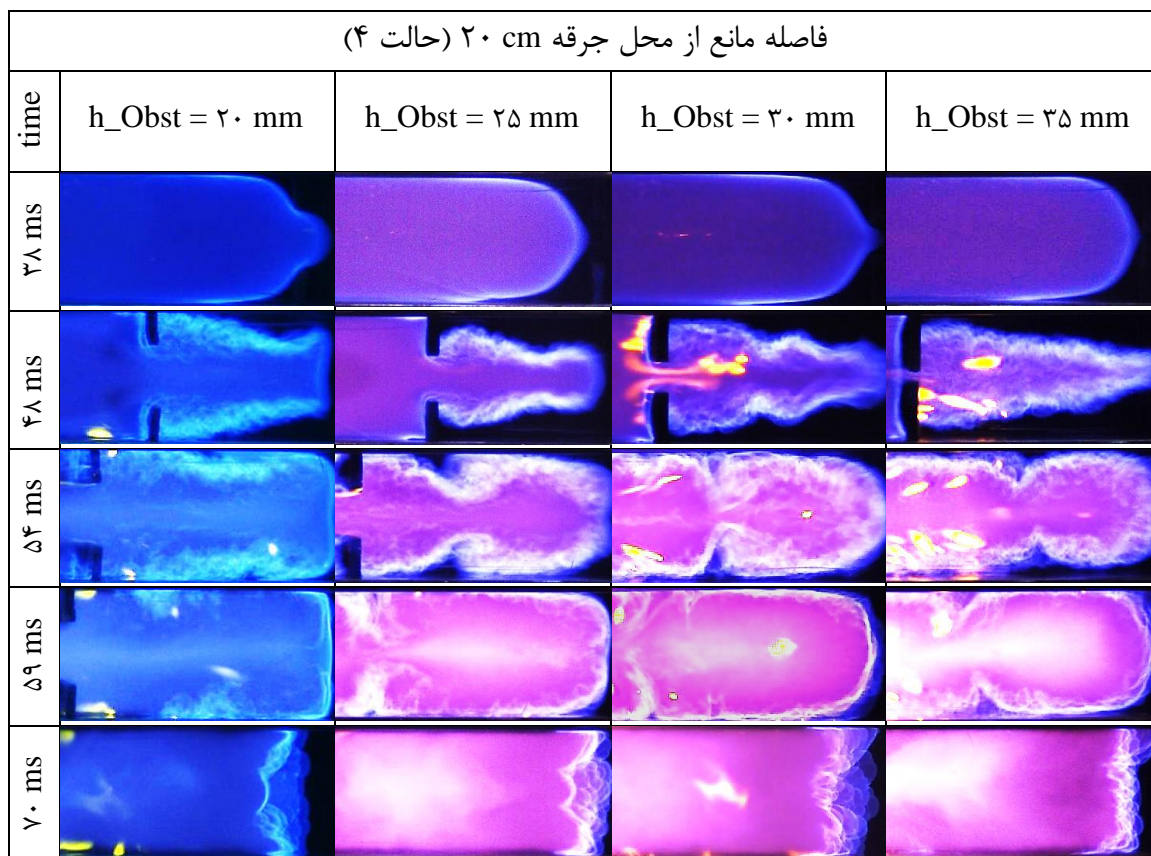
قسمت b شکل ۴-۱۷ تغییرات فشار داخل محفظه را برای حالت ۳ و چهار ارتفاع مختلف مانع را نشان داده است. نتایج برای این حالت به‌طور قابل توجهی متفاوت بوده و حداکثر فشار در داخل محفظه با افزایش ارتفاع مانع در زمان کوتاه‌تری رخ داده است. حداکثر فشار در داخل محفظه برای ارتفاع ۲۰ mm و ۲۵ mm در زمان ۲۰۰ ms و برای ارتفاع ۳۰ mm در ۱۵۰ ms و برای ارتفاع مانع ۳۵ mm در زمان ۱۰۰ ms رخ داده است. حداکثر فشار نسبت به حالت بدون حضور مانع، به ترتیب اندازه ارتفاع مانع، از کوچک به بزرگ ۳، ۲۰، ۵، ۱۴ درصد کاهش داشته است.





شکل ۴-۱۷ (a) موقعیت مکانی شعله و (b) تغییرات فشار با حضور مانع متخلخل با h_{Obst} متفاوت (حالت ۳)

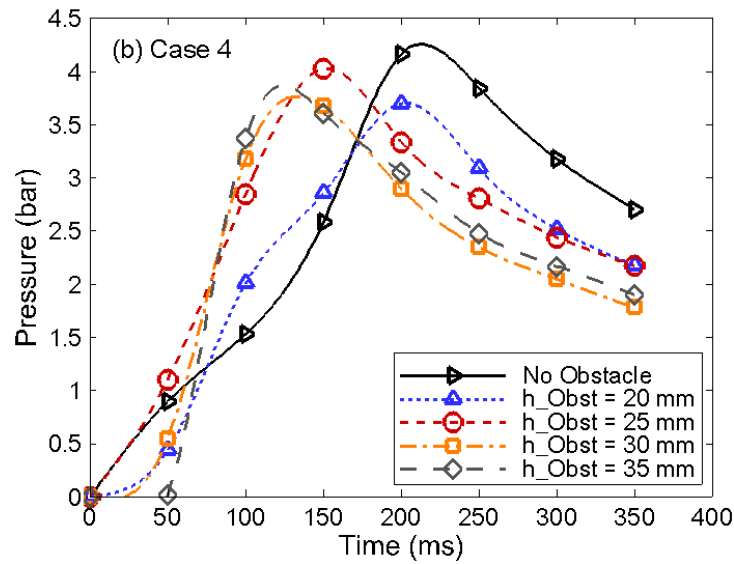
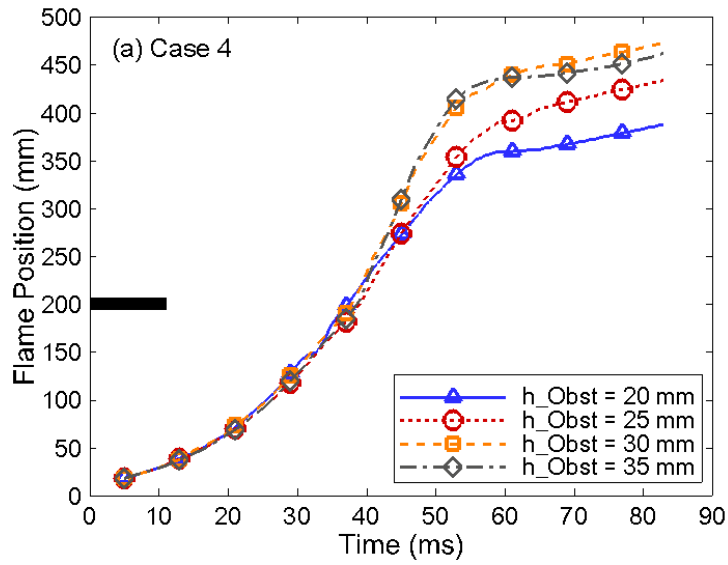
شکل ۴-۱۸ تصویر جبهه شعله برای حالت ۴ را نشان می‌دهد که برای ارتفاع‌های مختلف مانع و در زمان‌های مختلف در کنار هم نمایش داده شده است. در زمان ۴۸ ms شکل ۴-۱۸ تأثیر ارتفاع مانع متخلخل به وضوح دیده شده به این صورت که با افزایش ارتفاع مانع ساختار نفوذ شعله به داخل مخلوط نسوخته از حالت دوزنقه‌ای به شکل مثلثی تکامل یافته است. در این حالت آشفته‌ترین میدان‌های جریان در میان تمام آزمایش‌ها رخ داده است و تنها تخت شدن جبهه شعله اتفاق می‌افتد و ناپایداری برگشت جبهه شعله رخ نمی‌دهد. همان‌طور که زمان ۵۴ ms شکل ۴-۱۸ دیده می‌شود با افزایش ارتفاع مانع تخت شدن جبهه شعله دیرتر اتفاق افتاده است. در نهایت جبهه شعله در زمان ۷۰ ms شکل ۴-۱۸ که نزدیک به انتهای محفظه قرار دارد نشان داده شده است و در تصویر برای حالت ارتفاع مانع ۳۵ mm اغتشاش ایجاد شده در لبه بالای جبهه، ناشی از اثر محل نصب حسگر فشار در نزدیکی انتهای محفظه است.



شکل ۴-۱۸- تصویر شعله با حضور مانع متخلخل برای $h_{\text{Obst}} = 20 \text{ mm}, 25 \text{ mm}, 30 \text{ mm}, 35 \text{ mm}$ (حالت ۴)

شکل ۴-۱۹ موقعیت مکانی شعله و تغییرات فشار داخل محفظه را برحسب زمان، برای حالت ۴ را نشان داده است. با توجه به نمودار موقعیت مکانی جبهه نسبت به زمان که در قسمت a شکل ۴-۱۹ دیده می‌شود، سرعت جبهه شعله در مراحل اولیه رشد برای ارتفاع مانع ۲۰ mm و ۲۵ mm مشابه هم بوده و تنها برای ارتفاع ۲۵ mm شتاب شعله روند کاهشی کمتری داشته است و برای مانع با ارتفاع ۳۰ mm و ۳۵ mm سرعت و شتاب شعله کاملاً مشابه هم شده است. موقعیت مکانی تخت شدن جبهه شعله به ترتیب ارتفاع مانع از کوچک به بزرگ برابر ۳۵۹ mm، ۳۹۲ mm، ۴۴۵ mm و ۴۴۰ mm و در زمان ۵۹ ms، ۶۱ ms، ۶۳ ms و ۶۷ ms رخ داده است.

قسمت b شکل ۴-۱۹ تغییرات فشار داخل محفظه را برای حالت ۴ را نشان داده است. نتایج برای این حالت نیز به‌طور قابل توجهی متفاوت بوده و حداکثر فشار در داخل محفظه با افزایش ارتفاع مانع در زمان کوتاه‌تری رخ داده است.



شکل ۴-۱۹ (a) موقعیت مکانی شعله و (b) تغییرات فشار با حضور مانع متخلخل با h_{Obst} متفاوت (حالت ۱)

حداکثر فشار در داخل محفظه برای ارتفاع ۲۰ mm در زمان ۲۰۰ ms و برای ارتفاع ۲۵ mm در ۱۵۰ ms و برای ۳۰ mm و ۳۵ mm در زمان ۱۰۰ ms رخ داده است. حداکثر فشار نسبت به حالت بدون حضور مانع، به ترتیب اندازه ارتفاع مانع، از کوچک به بزرگ ۱۲، ۴، ۱۳، ۱۵ در صد کاهش داشته است.

فصل ۵- بحث و نتیجه‌گیری و

پیشنهادها

در این پژوهش اثر محیط متخلخل به صورت مانع در مقابل جریان احتراقی مخلوط استوکیومتری متان-هوا در یک کانال بسته به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. مطالعه رفتار شعله به کمک تصویربرداری با دوربین سرعت بالا به طور مستقیم از جبهه شعله انجام شده و تغییرات فشار به کمک یک فشارسنج در نزدیکی انتهای محفظه صورت گرفته است. آزمایش‌ها برای چهار ارتفاع مختلف مانع متخلخل ($h_{\text{Obst}} = 20 \text{ mm}, 25 \text{ mm}, 30 \text{ mm}, 35 \text{ mm}$) مورد مطالعه قرار گرفته و جهت تمرکز بیشتر بر اثر ماهیت محیط متخلخل و مقایسه آن با محیط صلب، برای یک حالت مانع با ارتفاع 20 mm مانعی از جنس چوب نیز آزمایش شده است.

۵-۲- نتیجه‌گیری برای اثر مانع‌های چوبی و متخلخل با ارتفاع 20 میلی‌متر

در این بخش آزمایش برای دو نوع مانع و چهار حالت که شامل چهار فاصله متفاوت از محل ایجاد ($5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}, 15 \text{ cm}, 20 \text{ cm}$) جرقه بررسی شده است. نتایج به صورت زیر قابل بیان است که:

۱- آشفستگی ایجاد شده در میدان جریان به وسیله مانع نقش اساسی در الگوی رشد جبهه شعله و مکانیزم انتشار آن دارد. در حقیقت افزایش آشفستگی در میدان جریان سرعت شعله و شتاب آن را در محیط بسته محفظه افزایش داده است. در مراحل اولیه رشد شعله بعد از عبور جبهه شعله از روی مانع، در مانع صلب شتاب شعله روند افزایشی داشته است اما در مانع متخلخل شتاب جبهه شعله تغییر چندانی نسبت به حالت بدون حضور مانع نداشته است و تنها مقدار شتاب مثبت اولیه برای مدت زمان بیشتری بقا یافته است.

۲- یک تفاوت اساسی دیگر بین مانع صلب و متخلخل برهم‌کنش آن‌ها با میدان جریان احتراقی بوده است. مانع متخلخل و مانع صلب در حجم مخلوط نسوخته اطراف آن‌ها باهم متفاوت بوده‌اند. این تفاوت به وضوح در شکل ۴-۴ زمان 30 ms ، شکل ۴-۶ زمان 33 ms ، شکل ۴-۸ زمان 41 ms و شکل ۴-۱۰ زمان 42 ms دیده می‌شود. در واقع مانع صلب که هم‌اندازه مانع

متخلخل است نسبت انسداد بزرگتری در مقابل جریان نیز ایجاد کرده است و این خود دلیلی برای افزایش شتاب اولیه شعله نیز هست.

۳- مانع متخلخل اجازه عبور مقداری از جریان را از میان خود می‌دهد و همچنین جریان برگشتی ایجاد شده در فرایند انتشار شعله نیز همین‌گونه است. از این رو، به هم‌ریختی ایجاد شده در میدان جریان هنگام عبور آن‌ها از مانع نسبتاً کم است. در مقابل، برخورد جریان با مانع صلب و همچنین برخورد جریان برگشتی با آن، ایجاد آشفتگی بیشتر و تولید موج‌های فشاری قوی‌تری نسبت به مانع متخلخل داشته است و در واقع مانع متخلخل موجب تقویت موج‌های فشاری نشده است.

۴- به هم‌ریختگی جبهه شعله در هر دو مانع تابعی از فاصله مانع‌ها از محل جرقه است. با افزایش فاصله مانع از محل جرقه، سرعت برخورد جبهه شعله با مانع دارای بزرگی بیشتری است زیرا جبهه شعله در فاصله‌های آزمایش شده در مراحل اولیه رشد خود بوده و شتاب مثبت دارد.

۵- فشار داخل محفظه نیز برای حالت‌های ۱ تا ۴ در مانع متخلخل و ۱ تا ۳ در مانع صلب در زمان ۲۰۰ میلی‌ثانیه مقدار حداکثری خود را تجربه کرده است. برای حالت ۴ در مانع صلب زمان موردنظر ۱۰۰ میلی‌ثانیه بوده است و در واقع این شرایط آشفته‌ترین حالت در میان آزمایش‌های صورت گرفته بوده و افزایش فشار با سرعت بیشتری نسبت حالت‌های دیگر از نظر زمانی شکل گرفته است.

۶- مانع متخلخل در تمام آزمایش‌ها نسبت به مانع صلب، اثر کاهشی بیشتری بر حداکثر فشار ایجاد شده در داخل محفظه داشته است. حداکثر فشار محفظه با حضور مانع متخلخل در چهار حالت، نسبت به حالت بدون حضور مانع به ترتیب: ۶، ۹، ۳ و ۱۱ درصد کاهش داشته و با حضور مانع صلب به ترتیب ۲، ۰.۲، ۱ و ۲ درصد کاهش داشته است. و دلیل فیزیکی فشار کاهش یافته اثر افزایش سطح به واسطه اضافه کردن مانع‌ها در داخل محفظه است و این سطوح اضافه شده که برای مانع صلب حدوداً ۷ درصد است که موجب افزایش اتلاف حرارتی مخلوط احتراقی و کاهش فشار آن شده است.

۵-۳- نتیجه‌گیری برای اثر ارتفاع مانع متخلخل

مانع متخلخل برای چهار ارتفاع مختلف ($h_{\text{Obst}} = 20 \text{ mm}, 25 \text{ mm}, 30 \text{ mm}, 35 \text{ mm}$) و برای هر ارتفاع مانع، چهار فاصله متفاوت از محل ایجاد جرقه به ترتیب ۵ cm، ۱۰ cm، ۱۵ cm و ۲۰ cm است، مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج به صورت زیر قابل بیان است که:

۱- آشفستگی ایجاد شده در میدان جریان به واسطه افزایش ارتفاع مانع متخلخل در تمامی حالت‌ها با افزایش ارتفاع مانع افزایش داشته است. البته میزان به هم ریختگی و تغییر الگوی انتشار جبهه شعله به فاصله مانع از محل جرقه نیز وابسته بوده است به این صورت که برای حالت ۱ (فاصله مانع از محل ایجاد جرقه برابر ۵ cm) تغییر ارتفاع مانع به واسطه سرعت کم جبهه شعله هنگام برخورد با مانع، چندان تأثیری بر پارامترهای انتشار شعله نداشته و تنها در حالت $h_{\text{Obst}} = 35 \text{ mm}$ میزان شتاب اولیه شعله افزایش داشته است. برای حالت ۲ نیز به همین ترتیب تنها برای ارتفاع مانع ۳۰ و ۳۵ میلی‌متر با افزایش ارتفاع مانع شتاب و سرعت شعله در مراحل اولیه رشد آن افزایش داشته است و برای ارتفاع ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر تفاوت چندان‌ی ایجاد نشده است. برای حالت ۳ افزایش ارتفاع مانع کاملاً تأثیرگذار بوده و با افزایش ارتفاع مانع از ۲۰ تا ۳۵ میلی‌متر سرعت و شتاب اولیه شعله افزایش قابل توجهی داشته است. برای حالت ۴ نیز، ارتفاع مانع ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر تقریباً مشابه هم شده است و برای ارتفاع‌های ۳۰ و ۳۵ میلی‌متر تغییرات سرعت و شتاب کاملاً مشابه هم بوده است.

۲- اندازه حداکثر فشار در داخل محفظه نسبت به حالت بدون حضور مانع، به ترتیب اندازه ارتفاع مانع از کوچک به بزرگ برای چهار فاصله متفاوت از محل ایجاد جرقه به صورت زیر کاهش داشته‌اند:

حالت ۱: ۶، ۶.۵، ۱۱، ۸ در صد کاهش، حالت ۲: ۹، ۶، ۵، ۹ در صد کاهش، حالت ۳: ۳، ۲۰، ۵، ۱۴ در صد کاهش و حالت ۴: ۱۲، ۴، ۱۳، ۱۵ در صد کاهش داشته است.

۳- زمان ایجاد حداکثر فشار نیز برای حالت‌های مختلف متفاوت بوده که به صورت زیر است:

برای حالت ۱: در تمام ارتفاع‌های مانع در زمان ۲۰۰ ms، حالت ۲: برای تمام مانع‌ها در حدود زمان ۲۰۰ ms به جز مانع با ارتفاع ۳۵ mm که در حدود زمان ۱۵۰ ms، حالت ۳: برای ارتفاع ۲۰ mm و ۲۵ mm در زمان ۲۰۰ ms و برای ارتفاع ۳۰ mm در ۱۵۰ ms و برای ارتفاع مانع ۳۵ mm در زمان ۱۰۰ ms و برای حالت ۴ حداکثر فشار در داخل محفظه برای ارتفاع ۲۰ mm در زمان ۲۰۰ ms و برای ارتفاع ۲۵ mm در ۱۵۰ ms و برای ۳۰ mm و ۳۵ mm در زمان ۱۰۰ ms رخ داده است؛ و به طور کلی افزایش ارتفاع مانع زمان ایجاد حداکثر فشار داخل محفظه را کاهش می‌دهد.

۴-۵- پیشنهادها

در مسیر ساخت و تهیه ابزار مورد نیاز برای انجام این پایان‌نامه، نکاتی وجود دارد که با اصلاح و بهبود بخشیدن آنها می‌تواند موجب بالا رفتن کیفیت نتایج و همچنین دقت بیشتر آزمایش‌های انجام شده در آینده گردد. این نکات به صورت زیر می‌باشند:

الف) اصلاح و یا ساخت مجدد مخزن مخصوص مخلوط کننده سوخت و هوا

ب) با توجه به دقت بسیار زیاد مبدل فشار الکترونیکی، استفاده از مبدل فشار به جای گیج فشار

عقره ای برای اندازه‌گیری فشارهای جزئی سوخت و هوا در محفظه اختلاط

ج) استفاده از سیستم جرقه‌زن خازنی که قابلیت اندازه‌گیری دقیق انرژی اولیه جرقه را نیز داشته

باشد.

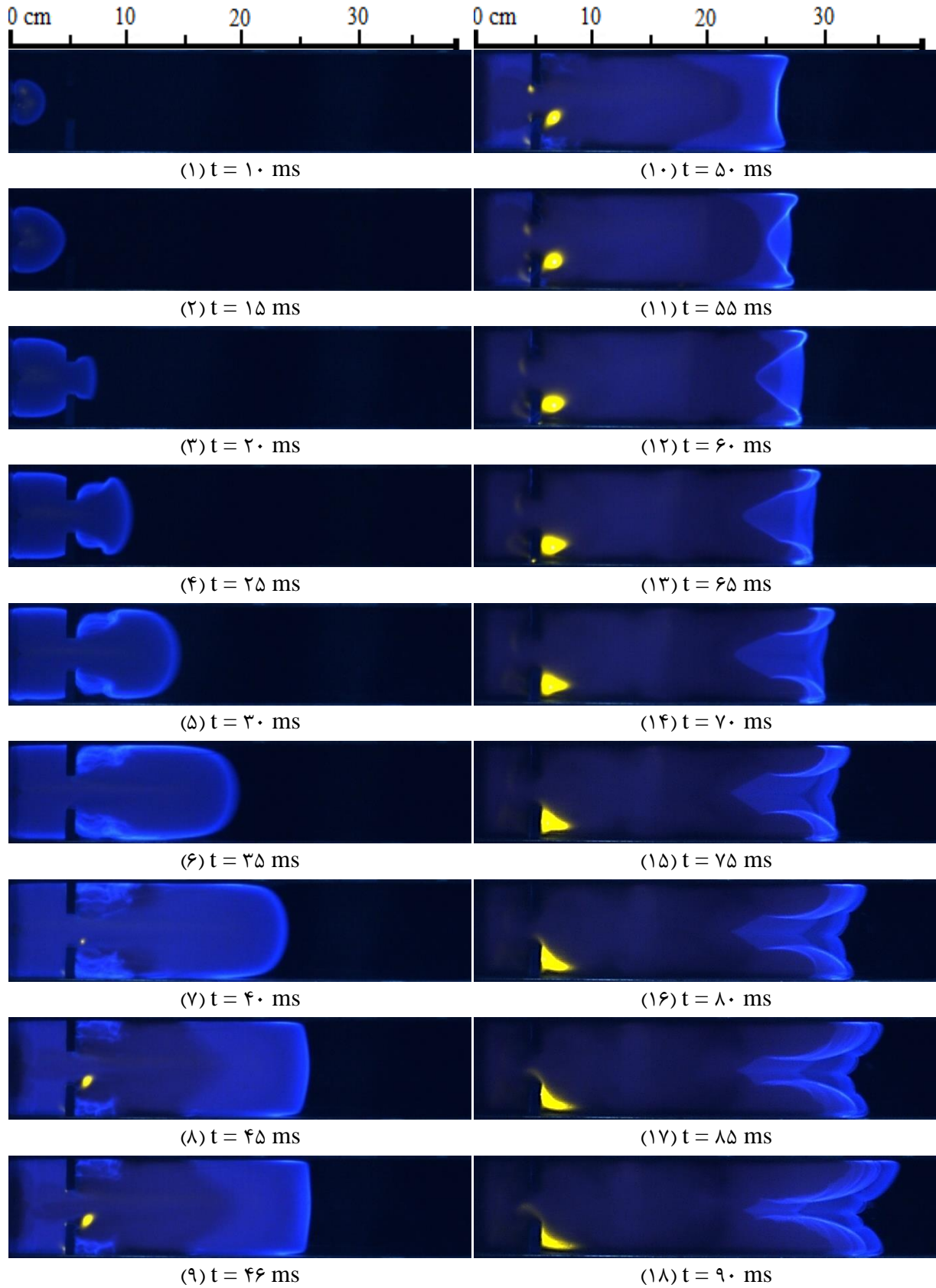
د) با توجه به ابعاد محفظه بهتر است که از یک لنز با فاصله کانونی در حدود ۳۵ تا ۵۰ میلیمتر،

برای عکس‌برداری استفاده شود.

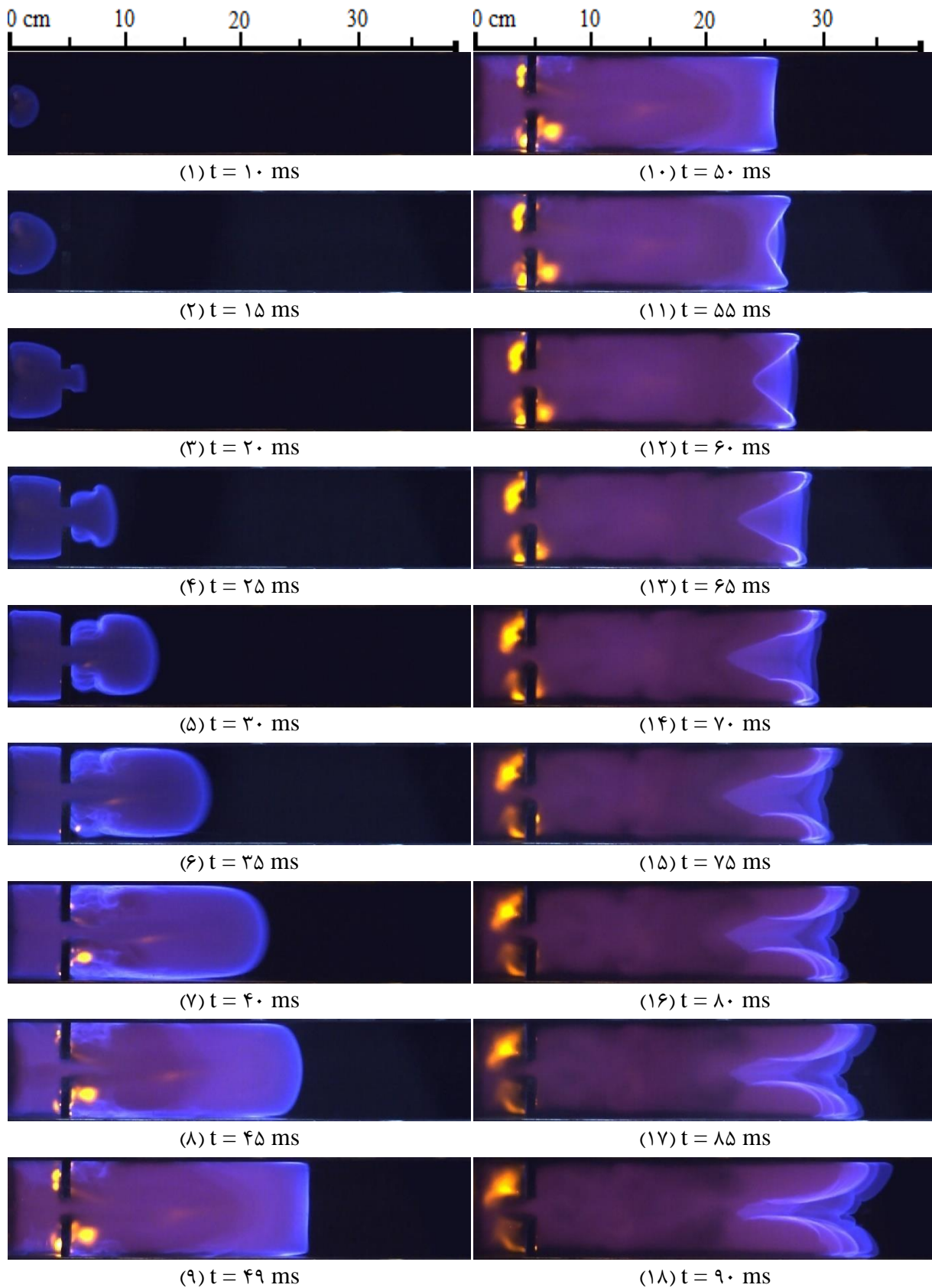
ه) به دلیل زمان کوتاه فرآیندهای آزمایش که در رنج دهم ثانیه هستند، لازم است که ثبت کننده

اطلاعات فشار داخل محفظه، با سرعت ثبت اطلاعات با قدرت میلی‌ثانیه تهیه و استفاده گردد.

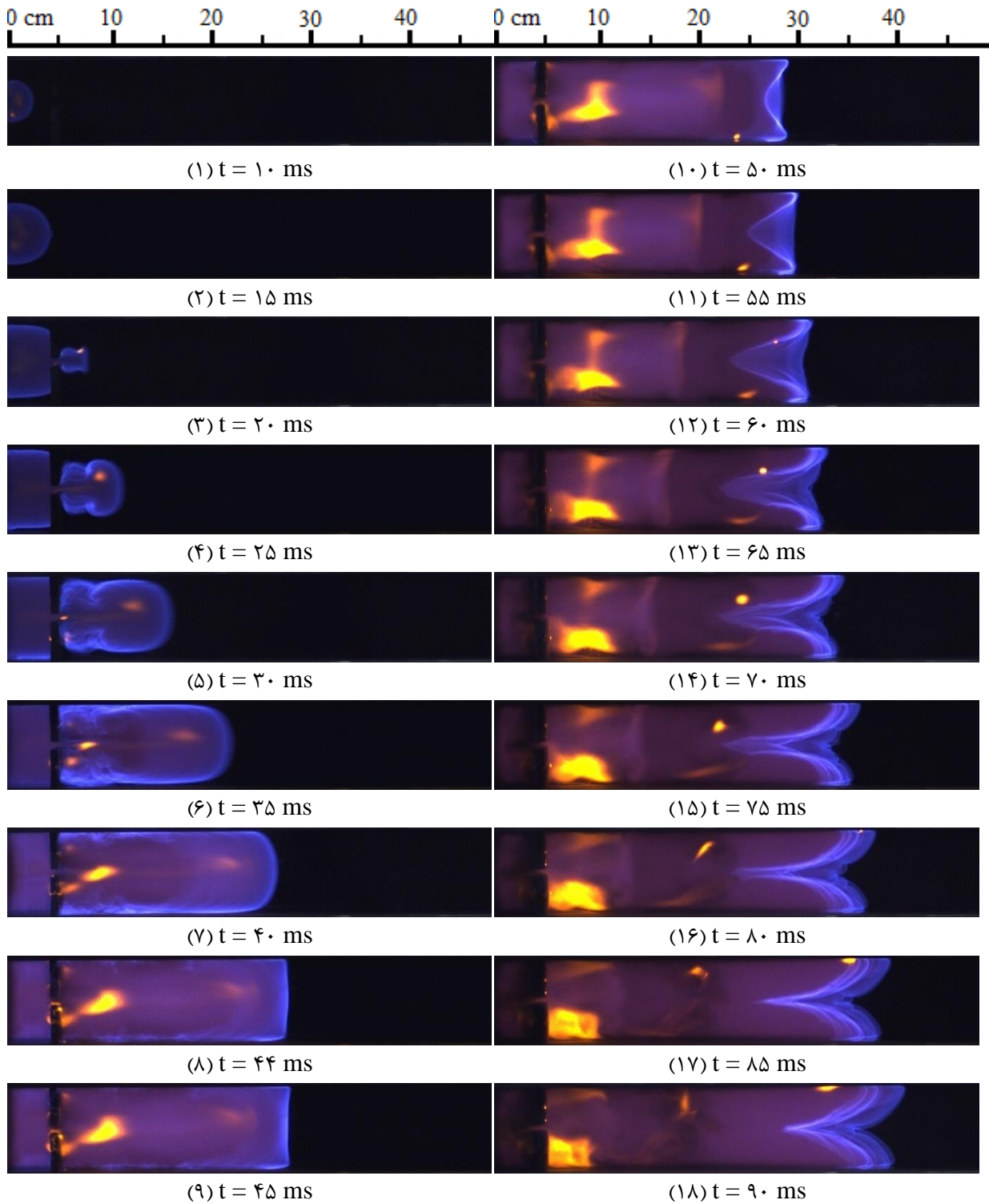
پیوست أ- تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۲۵ mm و فاصله ۵ cm از محل جرقه



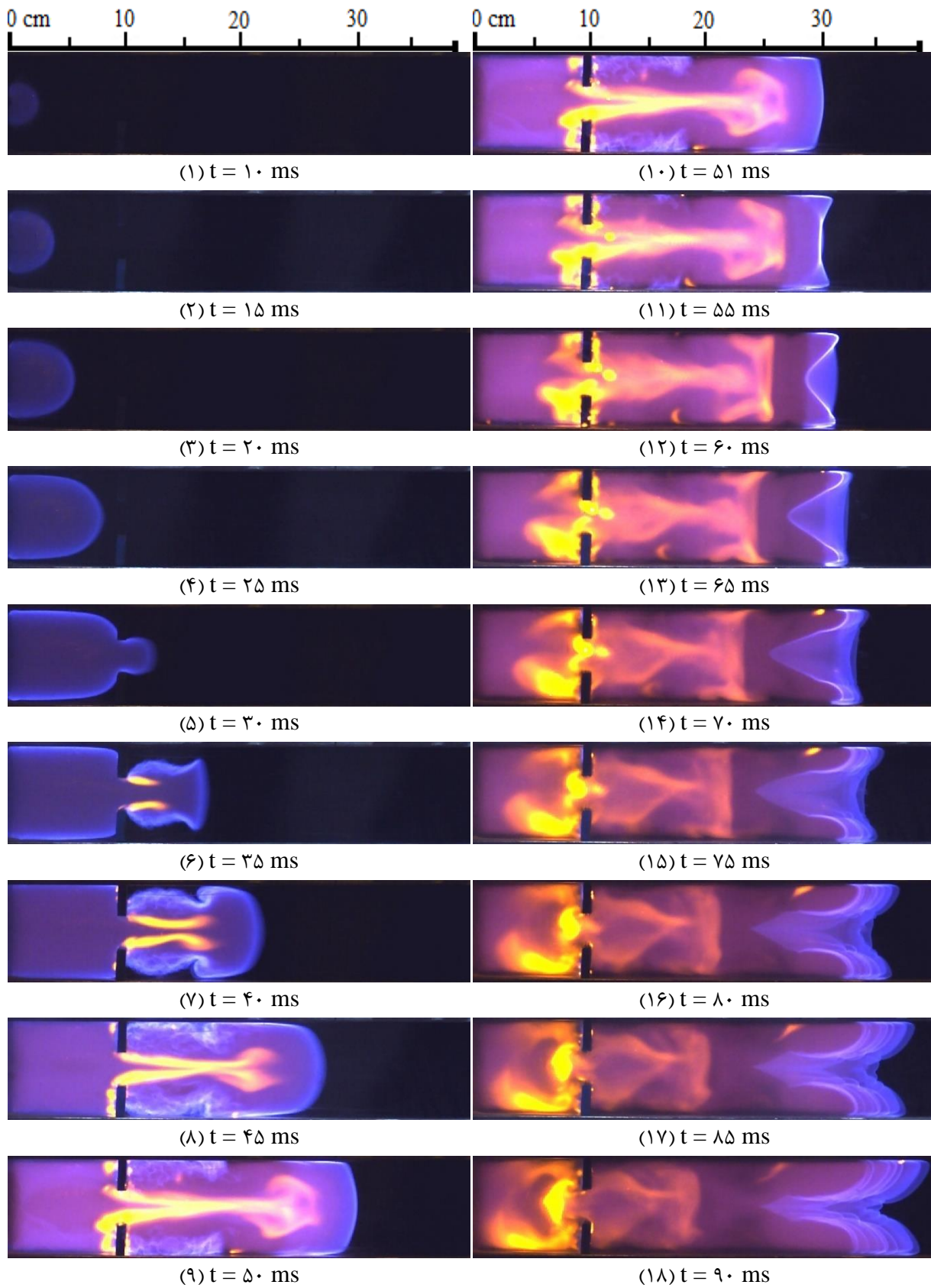
پیوست ب- تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۳۰ mm و فاصله ۵ cm از محل جرقه



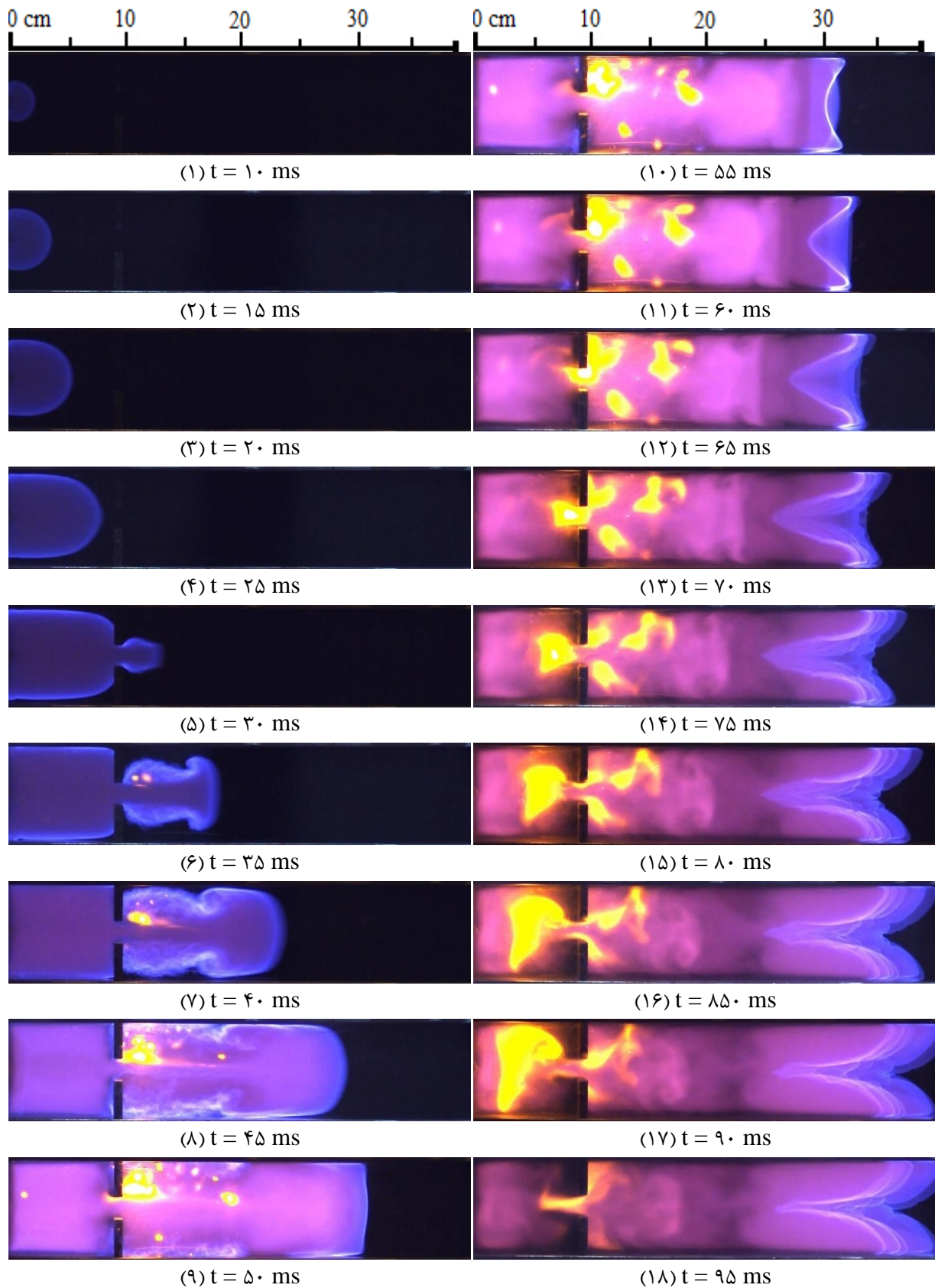
پیوست ج- تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۳۵ mm و فاصله ۵ cm از محل جرقه



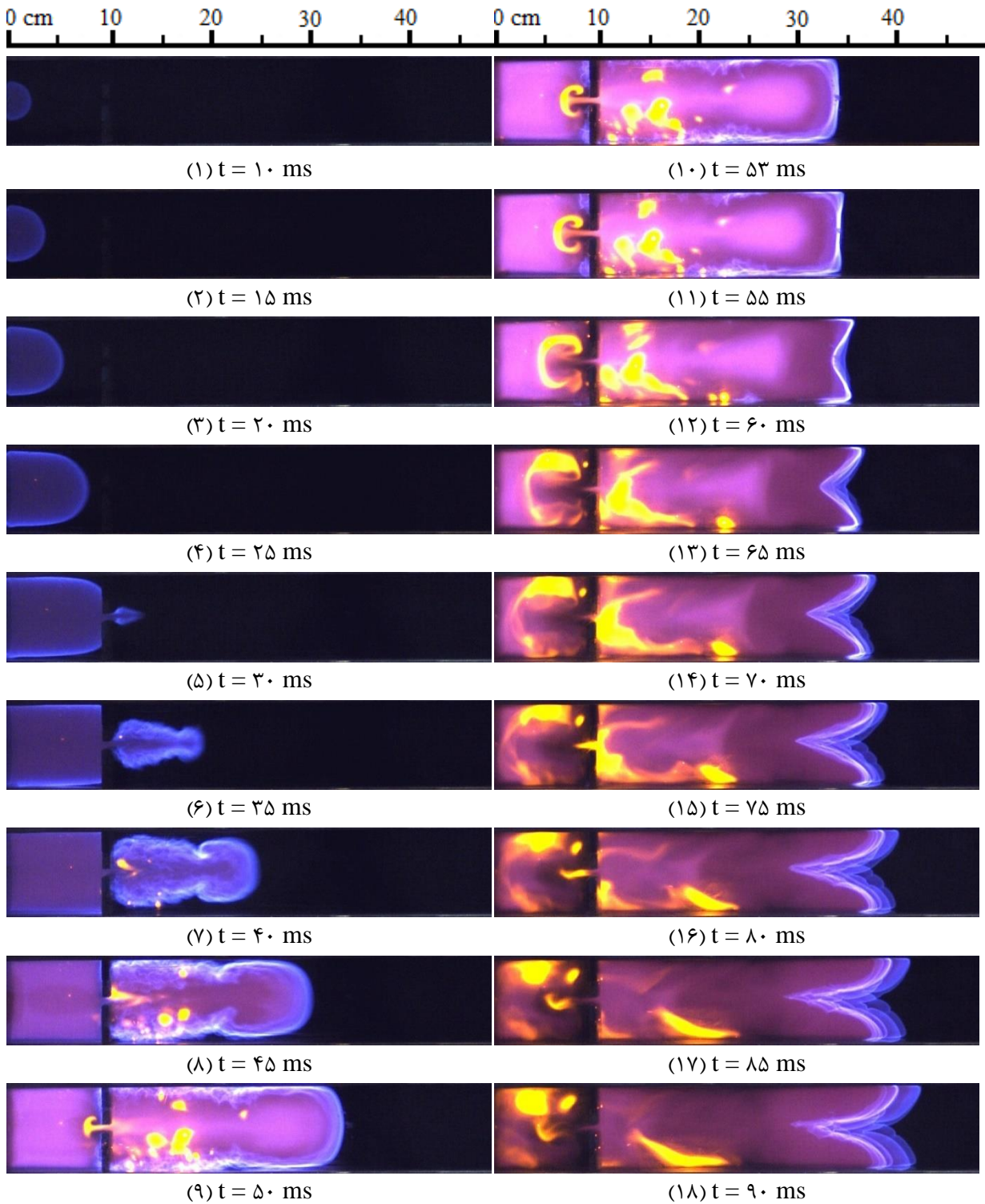
پیوست د- تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۲۵ mm و فاصله ۱۰ cm از محل جرقه



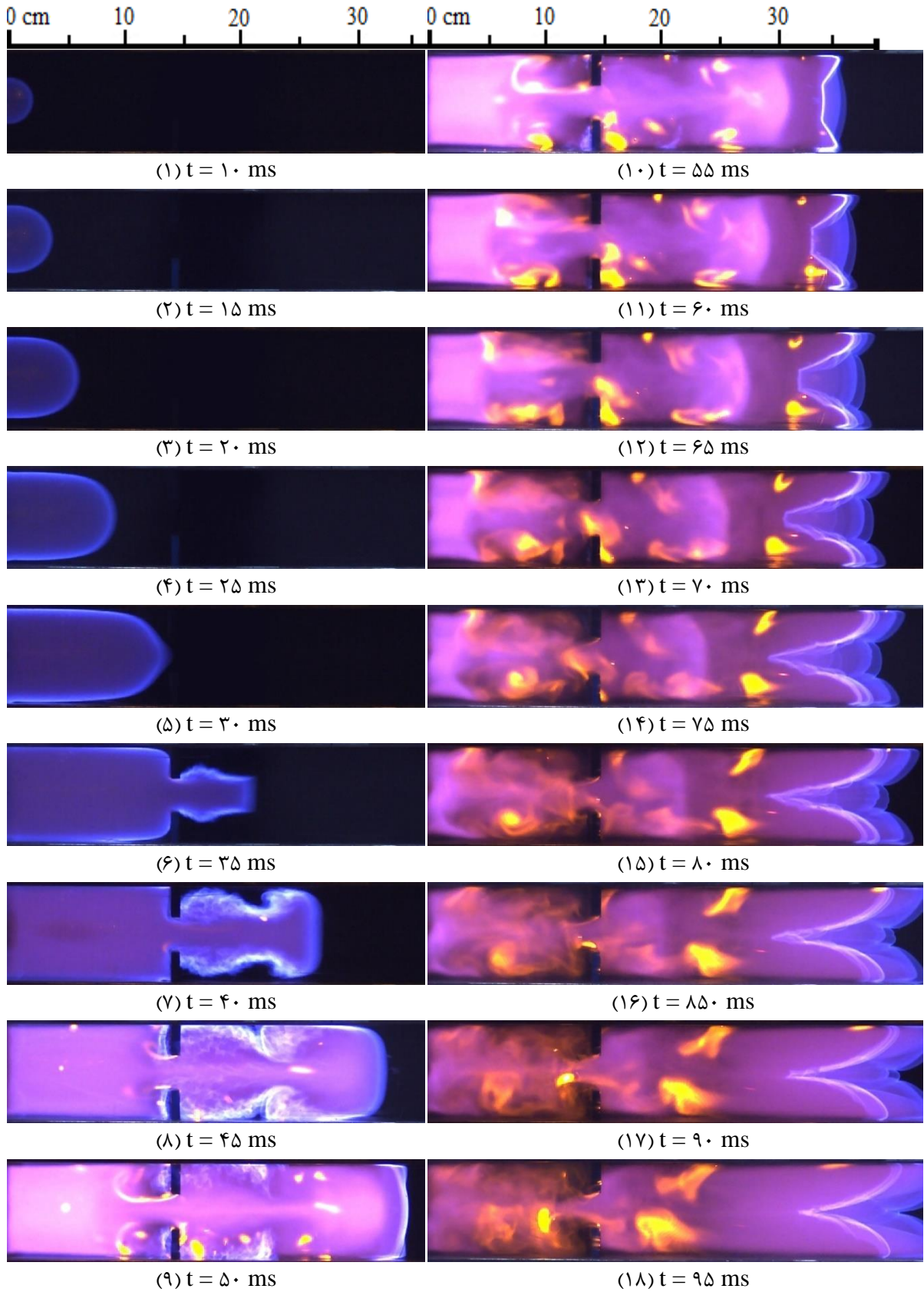
پیوست ه- تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۳۰ mm و فاصله ۱۰ cm از محل جرقه



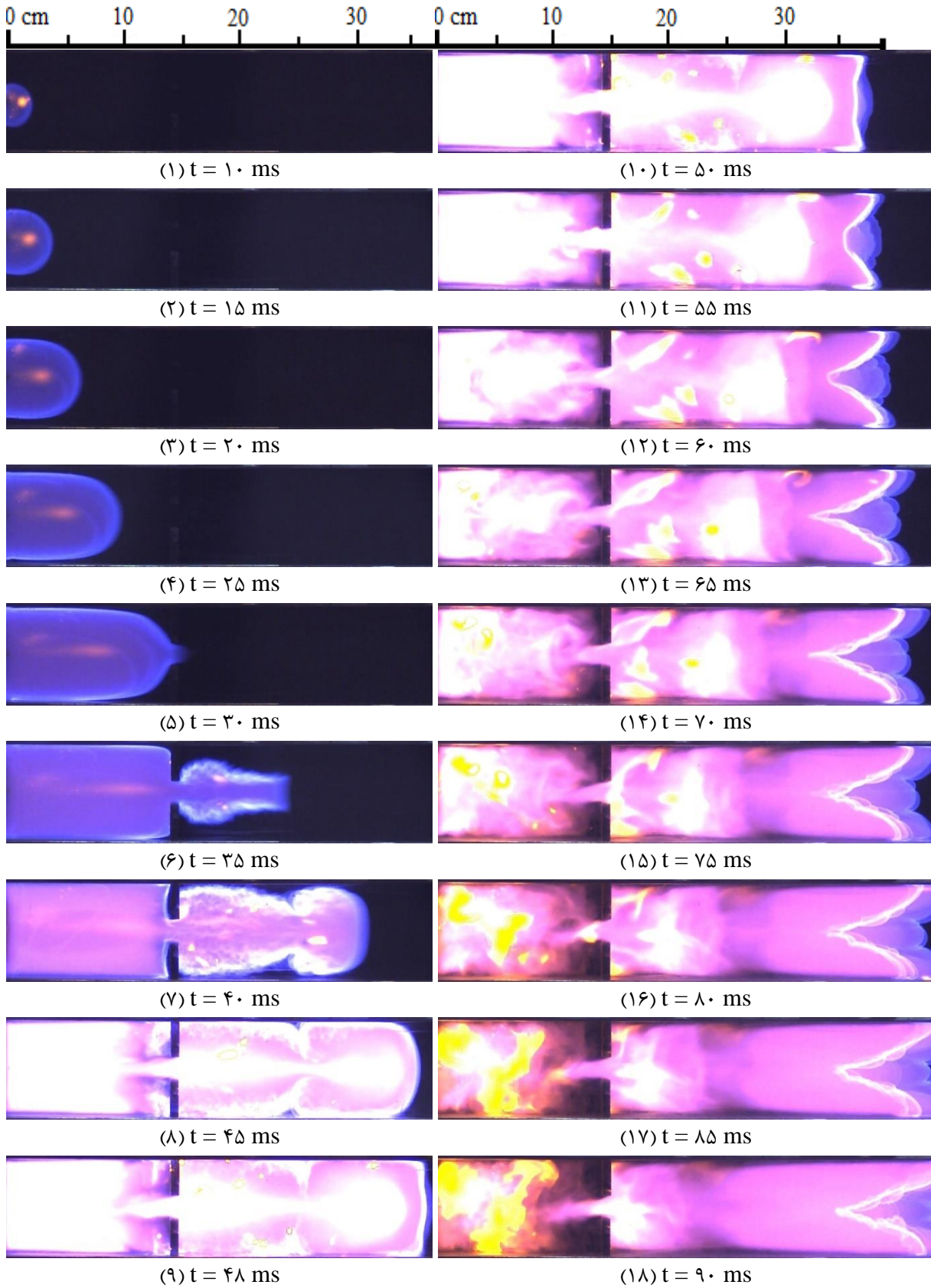
پیوست و- تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۳۵ mm و فاصله ۱۰ cm از محل جرقه



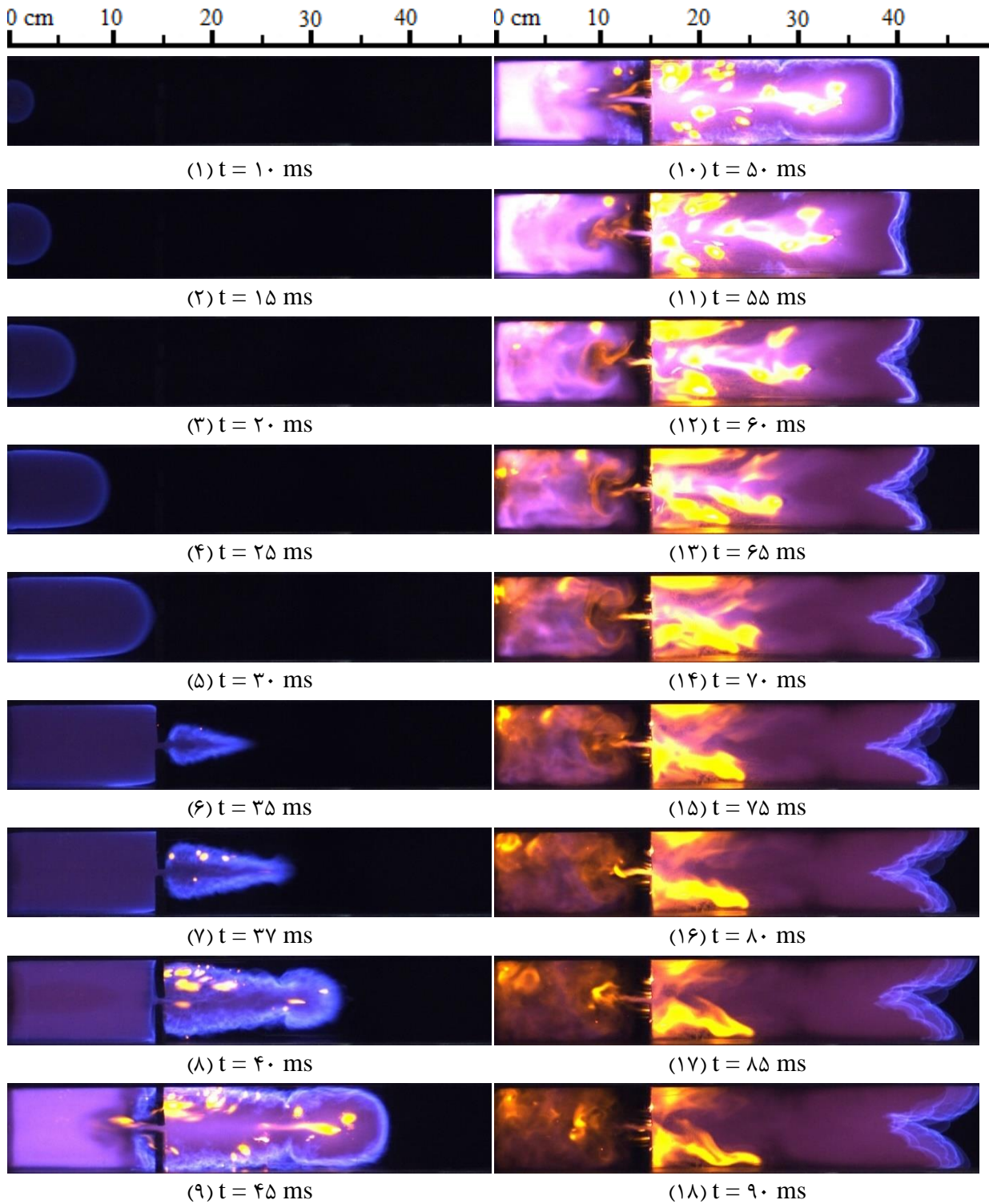
پیوست ز- تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۲۵ mm و فاصله ۱۵ cm از محل جرقه



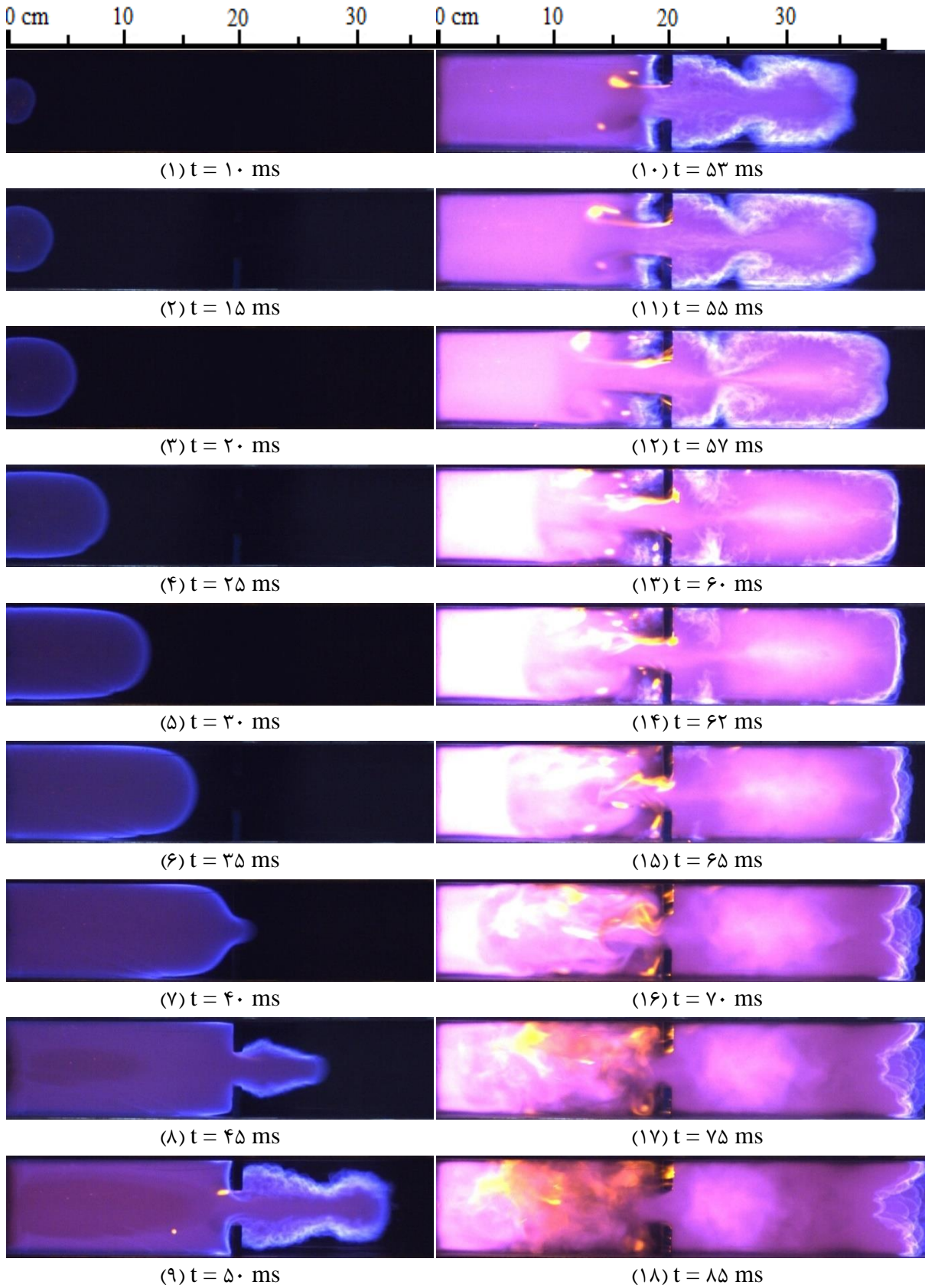
پیوست ح- تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۳۰ mm و فاصله ۱۵ cm از محل جرقه



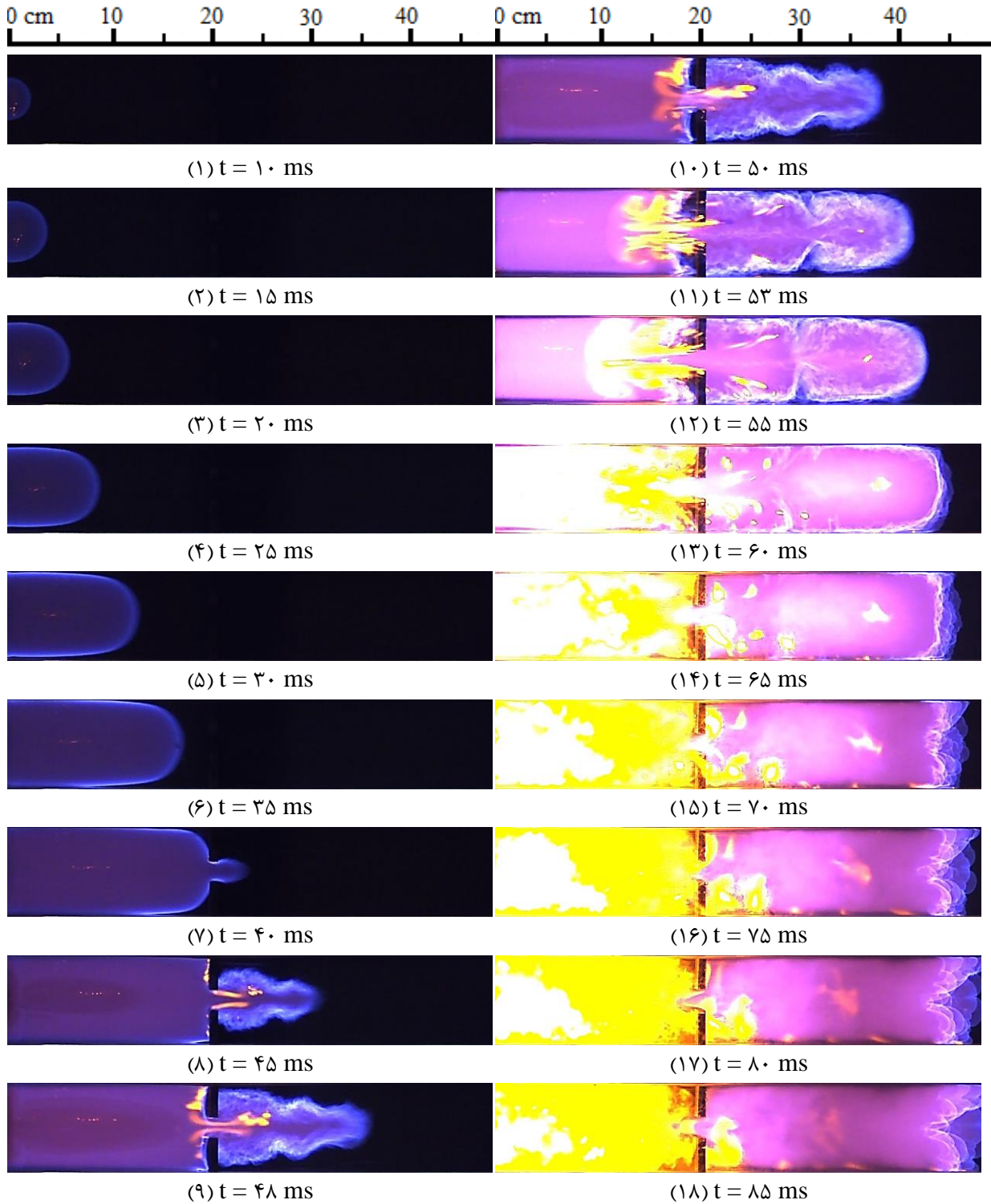
پیوست ط- تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۳۵ mm و فاصله ۱۵ cm از محل جرقه



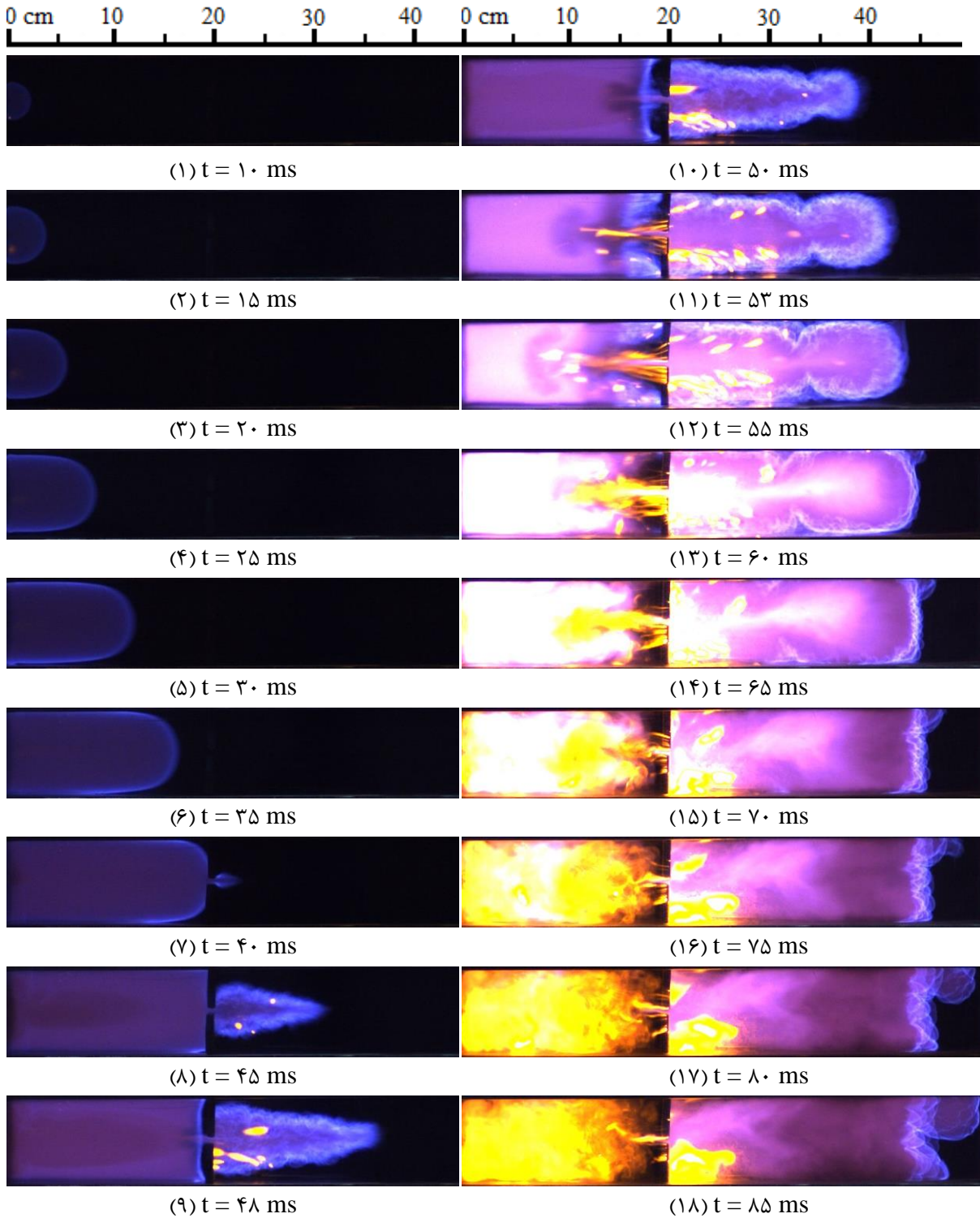
پیوست ی- تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۲۵ mm و فاصله ۲۰ cm از محل جرقه



پیوست ک- تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۳۰ mm و فاصله ۲۰ cm از محل جرقه



پیوست ل- تصویر شعله برای حالت مانع با ارتفاع ۳۵ mm و فاصله ۲۰ cm از محل جرقه



Pressure

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.

WIKA data sheet PE 81.01 - 09/2018

Page 1 of 9

Data sheets showing similar products:
Pressure transmitter for general industrial applications; model A-10; see data sheet PE 81.60
Superior pressure transmitter for general industrial applications; model S-20; see data sheet PE 81.61
Flush pressure transmitter for viscous and particle-laden media; model S-11; see data sheet PE 81.02

WIKA
Part of your business

Measuring ranges

Gauge pressure								
bar	Measuring range	0 ... 0.1	0 ... 0.16	0 ... 0.25	0 ... 0.4	0 ... 0.6	0 ... 1	0 ... 1.6
	Overload safety	1	1.5	2	2	4	5	10
	Measuring range	0 ... 2.5	0 ... 4	0 ... 6	0 ... 10	0 ... 16	0 ... 25	0 ... 40
bar	Overload safety	10	17	35	35	80	50	80
	Measuring range	0 ... 60	0 ... 100	0 ... 160	0 ... 250	0 ... 400	0 ... 600	0 ... 1,000
	Overload safety	120	200	320	500	800	1,200	1,500
psi	Measuring range	0 ... 5	0 ... 10	0 ... 15	0 ... 20	0 ... 25	0 ... 30	0 ... 50
	Overload safety	29	29	72.5	145	145	145	240
	Measuring range	0 ... 60	0 ... 100	0 ... 150	0 ... 160	0 ... 170	0 ... 200	0 ... 250
psi	Overload safety	240	500	500	1,160	1,160	1,160	1,160
	Measuring range	0 ... 300	0 ... 400	0 ... 500	0 ... 600	0 ... 750	0 ... 800	0 ... 1,000
	Overload safety	1,160	1,160	1,160	1,160	1,740	1,740	1,740
psi	Measuring range	0 ... 1,500	0 ... 1,600	0 ... 2,000	0 ... 3,000	0 ... 4,000	0 ... 5,000	0 ... 6,000
	Overload safety	2,900	4,600	4,600	7,200	7,200	11,600	11,600
	Measuring range	0 ... 7,500	0 ... 8,000	0 ... 10,000	0 ... 15,000			
psi	Overload safety	17,400	17,400	17,400	21,700			

Absolute pressure								
bar	Measuring range	0 ... 0.25	0 ... 0.4	0 ... 0.6	0 ... 1	0 ... 1.6	0 ... 2.5	0 ... 4
	Overload safety	2	2	4	5	10	10	17
	Measuring range	0 ... 6	0 ... 10	0 ... 16	0 ... 25	0.8 ... 1.2		
bar	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		

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
bar	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	
psi	Overload safety	500	1,160	1,160	1,160	

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

Vacuum tightness

Yes

Output signals

Signal type	Signal
Current (2-wire)	4 ... 20 mA
	20 ... 4 mA
Current (3-wire)	0 ... 20 mA
Voltage (3-wire)	DC 0 ... 10 V
	DC 0 ... 5 V
	DC 1 ... 5 V
	DC 0.5 ... 4.5 V ratiometric

Other output signals on request.

Load in Ω

- Current output (2-wire):
 \leq (power supply - 10 V) / 0.02 A
- Current output (3-wire):
 \leq (power supply - 3 V) / 0.02 A
- Voltage output (3-wire):
 $>$ maximum output signal / 1 mA

Voltage supply

Power supply

The power supply depends on the selected output signal

■ 4 ... 20 mA:	DC 10 ... 30 V
■ 20 ... 4 mA:	DC 10 ... 30 V
■ 0 ... 20 mA:	DC 10 ... 30 V
■ DC 0 ... 5 V:	DC 10 ... 30 V
■ DC 1 ... 5 V:	DC 10 ... 30 V
■ DC 0 ... 10 V:	DC 14 ... 30 V
■ DC 0.5 ... 4.5 V ratiometric:	DC 4.5 ... 5.5 V

Reference conditions (per IEC 61298-1)

Temperature

15 ... 25 °C [59 ... 77 °F]

Atmospheric pressure

860 ... 1,060 mbar [86 ... 106 kPa/12.5 ... 15.4 psig]

Humidity

45 ... 75 % r. h.

Power supply

DC 24 V

Mounting position

Calibrated in vertical mounting position with pressure connection facing downwards.

Accuracy specifications

Non-linearity (per IEC 61298-2)

$\leq \pm 0.2$ % of span BFSL

Non-repeatability (per IEC 61298-2)

≤ 0.1 % of span

Accuracy at reference conditions

Including non-linearity, hysteresis, zero offset and end value deviation (corresponds to measured error per IEC 61298-2).

Accuracy

Standard	$\leq \pm 0.50$ % of span
Option	$\leq \pm 0.25$ % of span ¹⁾

¹⁾ Only for measuring ranges ≥ 0.25 bar [≥ 3.6 psi]

Adjustability of zero point and span

Adjustment is made using potentiometers inside the instrument.

- Zero point: ± 5 %
- Span: ± 5 %

Temperature error at 0 ... 80 °C [32 ... 176 °F]

- Mean temperature coefficient of zero point:
 Measuring ranges ≤ 0.25 bar [≤ 3.6 psi]: ≤ 0.4 % of span/10 K
 Measuring ranges > 0.25 bar [> 3.6 psi]: ≤ 0.2 % of span/10 K

- Mean temperature coefficient of span:

≤ 0.2 % of span/10 K

Long-term stability at reference conditions

$\leq \pm 0.2$ % of span/year

Time response

Settling time

- ≤ 1 ms
- ≤ 2 ms for output signal DC 0.5...4.5 V ratiometric and measuring ranges < 0.4 bar [< 5.8 psi]

Operating conditions

Ingress protection (per IEC 60529)

For ingress protections see "Electrical connections"

The stated ingress protection only applies when plugged in using mating connectors that have the appropriate ingress protection

Vibration resistance (per IEC 60068-2-6)

20 g

Shock resistance (per IEC 60068-2-27)

1,000 g (mechanical)

Permissible temperature ranges

	Standard	Option
Medium	-30 ... +100 °C [-22 ... +212 °F]	-40 ... +125 °C [-40 ... +257 °F]
Ambient	-20 ... +80 °C [-4 ... +176 °F]	-20 ... +80 °C [-4 ... +176 °F]
Storage	-40 ... +100 °C [-40 ... +212 °F]	-40 ... +100 °C [-40 ... +212 °F]

Process connections

Standard	Thread size
EN 837	G ¼ B
	G ½ B
DIN EN ISO 1179-2 (formerly DIN 3852-E)	G ¼ A 1)
	G ¼ female
ANSI/ASME B1.20.1	¼ NPT
	½ NPT
SAE J514 E	7/16-20 UNF with 74° taper
-	M20 x 1.5
-	G ½ male / G ¼ female
ISO 7	R ¼

1) Maximum overload safety 600 bar [8,700 psi]

Other process connections on request

Materials

Wetted parts

Measuring ranges ≤ 25 bar [≤ 400 psi]: 316Ti

Measuring ranges > 25 bar [> 400 psi]: 316Ti and S13800

Non-wetted parts

- Case: 316Ti
- Internal pressure transmission medium:
 - Measuring ranges ≤ 25 bar [≤ 400 psi]: synthetic oil
 - Measuring ranges > 25 bar [> 400 psi]: dry measuring cell
- Clamping nut: PA
- Angular connector: PA
- O-rings at the clamping nut: NBR
- Flat gasket: VMQ

Electrical connections

Electrical connection	Ingress protection	Wire cross-section	Cable diameter	Cable lengths
Angular connector DIN 175301-803 A	IP65	max. 1.5 mm ²	6 ... 8 mm	-
Angular connector DIN 175301-803 with ½ NPT	IP65	max. 1.5 mm ²	-	-
Circular connector M12 x 1 (4-pin)	IP67	-	-	-
Bayonet connector (6-pin)	IP67	-	-	-
½ NPT conduit male, with cable outlet	IP67	3 x 0.5 mm ²	6.8 mm	1.5 m, 3 m, 5 m, 10 m, 5 ft, 10 ft, 20 ft, 30 ft, others on request
Cable outlet				
■ Standard	IP67	3 x 0.5 mm ²	6.8 mm	1.5 m, 3 m, 5 m, 10 m, 5 ft, 10 ft, 20 ft, 30 ft, others on request
■ not adjustable	IP68 ¹⁾	3 x 0.5 mm ²	6.8 mm	
■ adjustable	IP68 ¹⁾	3 x 0.5 mm ²	6.8 mm	

1) 72 h / 300 mbar [4.4 psi]

Short-circuit resistance

S+ vs. U-

Reverse polarity protection

U+ vs. U-

Overvoltage protection

DC 36 V

Insulation voltage

DC 500 V

Connection diagrams

Angular connector DIN 175301-803 A			
		2-wire	3-wire
	U+	1	1
	U-	2	2
	S+	-	3

Bayonet connector (6-pin)			
		2-wire	3-wire
	U+	A	A
	U-	B	B
	S+	-	C









Angular connector DIN 175301-803 A with ½ NPT			
		2-wire	3-wire
	U+	1	1
	U-	2	2
	S+	-	3

½ NPT conduit male, with cable outlet			
		2-wire	3-wire
	U+	red (RD)	red (RD)
	U-	black (BK)	black (BK)
	S+	-	brown (BN)

Circular connector M12 x 1 (4-pin)			
		2-wire	3-wire
	U+	1	1
	U-	3	3
	S+	-	4

Cable outlets			
		2-wire	3-wire
	U+	brown (BN)	brown (BN)
	U-	green (GN)	green (GN)
	S+	-	white (WH)
	Shield	grey (GY)	grey (GY)

Approvals

Logo	Description	Country
	EU declaration of conformity ■ EMC directive EN 61326 emission (group 1, class B) and interference immunity (industrial application) ■ Pressure equipment directive ■ RoHS directive	European Union
	CSA Safety (e.g. electr. safety, overpressure, ...)	Canada
	EAC EMC directive	Eurasian Economic Community
	GOST Metrology, measurement technology	Russia
	KazInMetr Metrology, measurement technology	Kazakhstan
-	MTSCHS Permission for commissioning	Kazakhstan
	BelGIM Metrology, measurement technology	Belarus
	UkrSEPRO Metrology, measurement technology	Ukraine
	Uzstandard Metrology, measurement technology	Uzbekistan
-	CRN Safety (e.g. electr. safety, overpressure, ...)	Canada

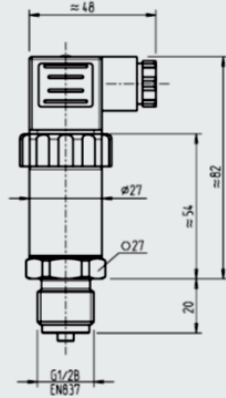
Manufacturer's information and certifications

Logo	Description
-	MTTF: > 100 years
-	China RoHS directive

Approvals and certificates, see website

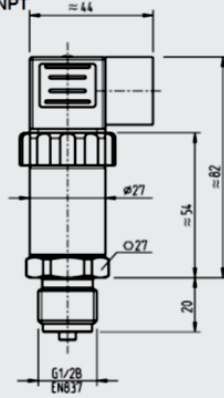
Dimensions in mm

with angular connector DIN 175301-803 A



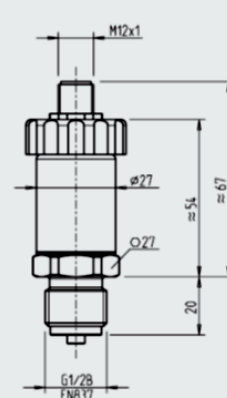
Weight: approx. 0.2 kg

with angular connector DIN 175301-803 with 1/2 NPT



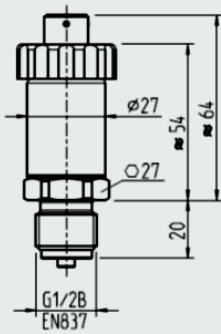
Weight: approx. 0.2 kg

with circular connector M12 x 1 (4-pin)



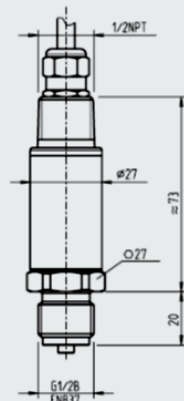
Weight: approx. 0.2 kg

with bayonet connector (6-pin)



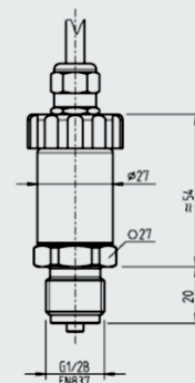
Weight: approx. 0.2 kg

with 1/2 NPT conduit male, with cable outlet



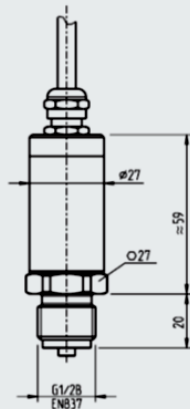
Weight: approx. 0.2 kg

with cable outlet, standard



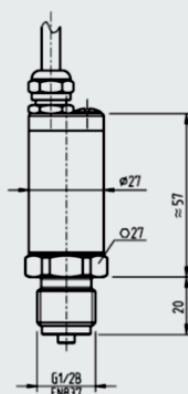
Weight: approx. 0.2 kg

with cable outlet, not adjustable



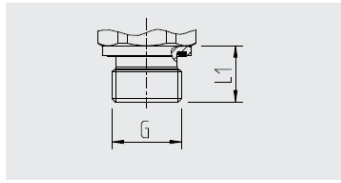
Weight: approx. 0.2 kg

with cable outlet, adjustable

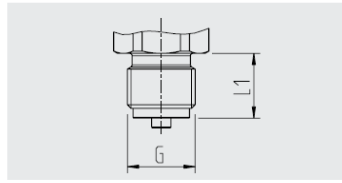


Weight: approx. 0.2 kg

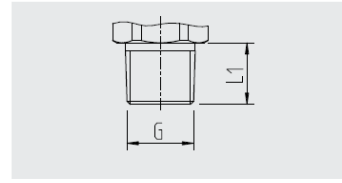
Process connections



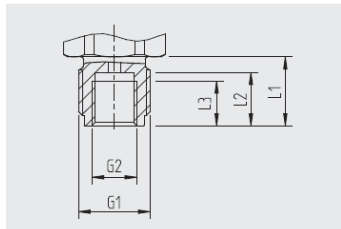
G	L1
G 1/4 A	12



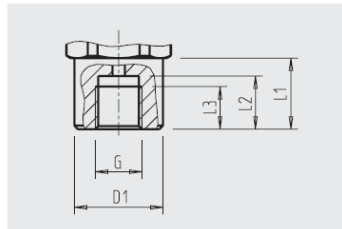
G	L1
G 1/4 B	13
G 1/2 B	20
M20 x 1,5	20



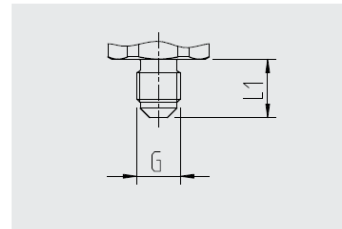
G	L1
1/4 NPT	13
1/2 NPT	19
R 1/4	13



G1	G2	L1	L2	L3
G 1/2 B	G 1/4	20	15,5	13



G	D1	L1	L2	L3
G 1/4 female	25	20	15	12



G	L1
7/16-20 UNF with 74° taper	15

For information on tapped holes and welding sockets, see Technical Information IN 00.14 at www.wika.com.

Accessories and spare parts

Mating connector

Description	Order number		
	without cable	with 2 m cable	with 5 m cable
Angular connector DIN 175301-803 A			
■ with cable gland, metric	11427567	11225793	11250186
■ with cable gland, conduit	11022485	-	-
Circular connector M12 x 1 (4-pin)			
■ straight	2421262	11250780	11250259
■ angled	2421270	11250798	11250232

Sealings for mating connectors

Mating connector	Order number
Angular connector DIN 175301-803 A	1576240

Sealings for process connection

Thread size	Order number			
	Copper	Stainless steel	NBR	FKM
G 1/4 B EN 837	11250810	11250844	-	-
G 1/2 B EN 837	11250861	11251042	-	-
G 1/4 A DIN 3852-E	-	-	1537857	1576534
M20 x 1.5	11250861	11251042	-	-

Ordering information

Model / Measuring range / Output signal / Accuracy / Electrical connection / Medium temperature / Process connection

© 03/1997 WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG, all rights reserved.
The specifications given in this document represent the state of engineering at the time of publishing.
We reserve the right to make modifications to the specifications and materials.



WIKAL Alexander Wiegand SE & Co. KG
Alexander-Wiegand-Straße 30
63911 Klingenberg/Germany
Tel. +49 9372 132-0
Fax +49 9372 132-406
info@wika.de
www.wika.de

پیوست ن - گواهی کالیبراسیون مبدل فشار



کالیبس
شرکت کاوش افزار سه‌نند
خدمات کالیبراسیون



Page 1 of 1

مشخصات متقاضی و دستگاه کالیبره شده :		Costumer & equipment specification:	
نام متقاضی : دانشگاه صنعتی شاهرود	تاریخ کالیبراسیون : 1396/10/13	نام دستگاه : ترانسمیتر فشار	تاریخ اعتبار (پیشنهادی) : 1397/10/13
شرکت سازنده: WIKA	شماره سریال: 1A0070EZ520	مدل : A - 10	ریزننگری : -----
گستره : 0_10 bar / 4_20 mA			

شرایط کالیبراسیون :		Calibration condition :	
استاندارد مرجع: Standard Test Gauge AEP Italy & Pressure Calibrator Made by: FLUKE Model:717 Cer.No.: NC94.36.120	شرایط محیطی: دمای متوسط 20 ± 2 درجه سلسیوس و رطوبت نسبی $45 \pm 15\%$	روش کالیبراسیون: کالیبراسیون فشار سنج های الکتریکی با شماره مدرک CS-W06-00	عدم قطعیت اندازه گیری با سطح اطمینان 95% و $K=2$ برابر ± 0.05 bar برآورد شده است.
		کالیبراسیون انجام شده قابلیت ردیابی به استانداردهای ملی و بین المللی را دارا می باشد.	

نتایج کالیبراسیون

ردیف	%	مقدار مرجع		مقدار خوانده شده (ذات)		مقدار خوانده شده (برگشت)	
		bar	mA	bar	mA	bar	mA
1	0	0.000	3.997	-0.002	3.997	-0.001	3.999
2	25	2.500	7.981	2.488	7.981	2.489	7.982
3	50	5.000	11.971	4.982	11.971	4.981	11.970
4	75	7.500	15.960	7.475	15.960	7.474	15.958
5	100	10.000	19.932	9.958	19.932	9.957	19.931

* معیار تشخیص و پذیرش انحراف به عهده استفاده کننده می باشد *

○ این گواهینامه بدون مهر آزمایشگاه فاقد اعتبار است.

○ استفاده کننده باید در فاصله زمانی معین نسبت به کالیبراسیون مجدد اقدام کند.

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

خیابان استاد مطهری، خیابان مفتح، کوچه مرزبان نامه، پلاک ۲۴

تلفن: ۸۸۸۱۴۳۶۰ تلفکس: ۸۸۳۰۴۹۸۹

شماره فرم: CS-F46-00

www.calibs.net info@calibs.net

Bourdon tube pressure gauge Stainless steel version Models 232.50, 233.50

WIKA data sheet PM 02.02



for further approvals
see page 3

Applications

- With liquid-filled case for applications with high dynamic pressure loads or vibrations ¹⁾
- For gaseous and liquid aggressive media that are not highly viscous or crystallising, also in aggressive ambience
- Process industry: Chemical/petro-chemical, power stations, mining, on- and offshore, environmental technology, machine building and general plant construction

Special features

- Excellent load-cycle stability and shock resistance
- All stainless steel construction
- German Lloyd approval
- Scale ranges up to 0 ... 1,600 bar



Bourdon tube pressure gauge model 232.50

Description

Design
EN 837-1

Nominal size in mm
63, 100, 160

Accuracy class
NS 63: 1.6
NS 100, 160: 1.0

Scale ranges
NS 63: 0 ... 1 to 0 ... 1,000 bar
NS 100: 0 ... 0.6 to 0 ... 1,000 bar
NS 160: 0 ... 0.6 to 0 ... 1,600 bar
or all other equivalent vacuum or combined pressure and vacuum ranges

¹⁾ Model 233.50

Pressure limitation

NS 63:	Steady:	3/4 x full scale value
	Fluctuating:	2/3 x full scale value
	Short time:	Full scale value
NS 100, 160:	Steady:	Full scale value
	Fluctuating:	0.9 x full scale value
	Short time:	1.3 x full scale value

Permissible temperature

Ambient: -40 ... +60 °C without liquid filling
-20 ... +60 °C gauges with glycerine filling ¹⁾
Medium: +200 °C maximum without liquid filling
+100 °C maximum with liquid filling ¹⁾

Temperature effect

When the temperature of the measuring system deviates from the reference temperature (+20 °C):
max. ±0.4 %/10 K of full scale value

Ingress protection

IP65 per EN 60529 / IEC 60529

Standard version

Process connection

Stainless steel 316L (NS 63: 1.4571),
Lower mount (LM) or lower back mount (LBM), NS 63 centre
back mount (CBM)
NS 63: G ¼ B (male), 14 mm flats
NS 100, 160: G ½ B, 22 mm flats

Pressure element

Stainless steel 316L
C-type or helical type

Movement

Stainless steel

Dial

Aluminium, white, black lettering,
NS 63 with pointer stop pin

Pointer

Aluminium, black

Case

Stainless steel, with pressure relief at case circumference,
12 o'clock (NS 63) and on the back of the case (NS 100
and 160),
Scale ranges $\leq 0 \dots 16$ bar with compensating valve to vent
case

Window

Laminated safety glass
(NS 63: Polycarbonate)

Ring

Cam ring (bayonet type), stainless steel

Filling liquid (for model 233.50)

Glycerine 99.7 %
(Glyzerine 86.5 % for scale range $\leq 0 \dots 2.5$ bar)

Options










- Other process connection
- Sealings (model 910.17, see data sheet AC 09.08)
- Assembly on diaphragm seals see product review DS
- Measuring system Monel (model 26x.50, not with NS 160
back mount connection)
- Surface or panel mounting flange, stainless steel
- Panel mounting flange, polished stainless steel
- Triangular bezel, polished stainless steel, with clamp
- Ambient temperatures -40 °C: Silicone oil filling
- Limit indicator at NS 100 and 160, see data sheet
SP 09.03
- Pressure gauge with switch contacts, see model
PGS23.1x0, data sheet PV 22.02
- Pressure gauge with electrical output signal, see model
PGT23.100/160, data sheet PV 12.04

Special versions

Gauges for ammonia plants (NS 100 and 160)

With temperature scale for refrigerant R 717 (NH₃) in °C,
Scale ranges: $-1 \dots 0 \dots 15$ bar or $-1 \dots 0 \dots 26$ bar

Approvals

Logo	Description	Country
	EU declaration of conformity <ul style="list-style-type: none"> ■ Pressure equipment directive PS > 200 bar, module A, pressure accessory ■ ATEX directive (option) Ignition protection type "c" - constructive safety 	European Union
	EAC (option) <ul style="list-style-type: none"> ■ Pressure equipment directive ■ Hazardous areas 	Eurasian Economic Community
	GOST (option) Metrology, measurement technology	Russia
	KazInMetr (option) Metrology, measurement technology	Kazakhstan
-	MTSCHS (option) Permission for commissioning	Kazakhstan
	BelGIM (option) Metrology, measurement technology	Belarus
	UkrSEPRO (option) Metrology, measurement technology	Ukraine
	Uzstandard (option) Metrology, measurement technology	Uzbekistan
-	CPA (option) Metrology, measurement technology	China
	KCs KOSHA (option) Hazardous areas	South Korea
	GL (option) Ships, shipbuilding (e.g. offshore)	International
-	CRN Safety (e.g. electr. safety, overpressure, ...)	Canada

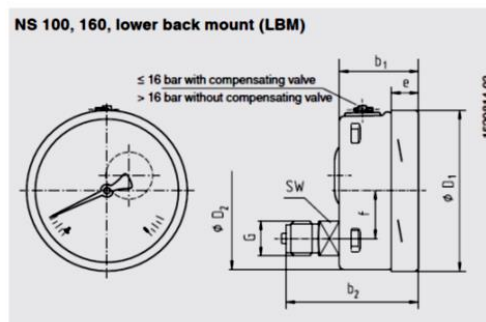
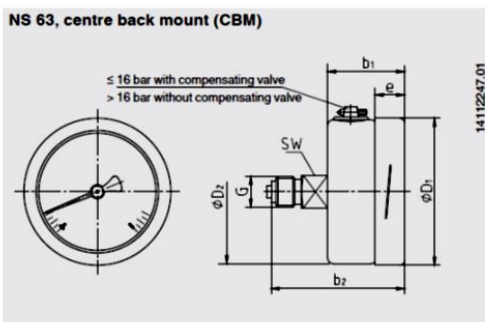
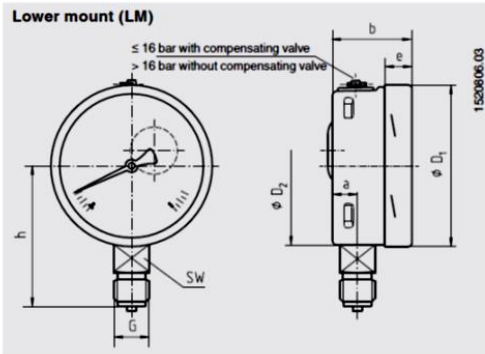
Certificates (option)

- 2.2 test report
- 3.1 inspection certificate

Approvals and certificates, see website

Dimensions in mm

Standard version



NS	Dimensions in mm											Weight in kg	
	a	b	b ₁	b ₂	D ₁	D ₂	e	f	G	h ±1	SW	Model 232.50	Model 233.50
63	9.5	33	33	57	63	62	11.5	-	G ¼ B	54	14	0.16	0.20
100	15.5	49.5	49.5	83	101	99	17.5	30	G ½ B	87	22	0.60	0.90
160	15.5	49.5 ²⁾	49.5 ²⁾	83 ¹⁾	161	159	17.5	50	G ½ B	118	22	1.10	2.00

Process connection per EN 837-1 / 7.3

- 1) Plus 16 mm with scale ranges ≥ 100 bar
- 2) Plus 16 mm with scale range 1,600 bar

Ordering information

Model / Nominal size / Scale range / Connection size / Connection location / Options

© 2000 WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG, all rights reserved.
The specifications given in this document represent the state of engineering at the time of publishing.
We reserve the right to make modifications to the specifications and materials.



WIKAL Alexander Wiegand SE & Co. KG
Alexander-Wiegand-Straße 30
63911 Klingenberg/Germany
Tel. +49 9372 132-0
Fax +49 9372 132-406
info@wika.de
www.wika.de

پیوست ع- مشخصات فنی دوربین پرسرعت

pco.dimax S

high speed CMOS cameras

highest
color fidelity

excellent
light sensitivity



high speed
4467 fps
@ 1 Mpixel

high resolution
1008 x 1008 pixel S1
2016 x 2016 pixel S4

1288 
EMVA Standard Compliant

pco.

features

free of session referencencing

With innovative use of on chip information, the pco.dimax offers an operation free from session referencencing, which does not require any additional mechanical shutter for dark referencencing. The pco.dimax incorporates an internal fully automatic referencencing feature that does not require additional operator intervention. Therefore it is possible to change frame rates "on the fly" (during recording).

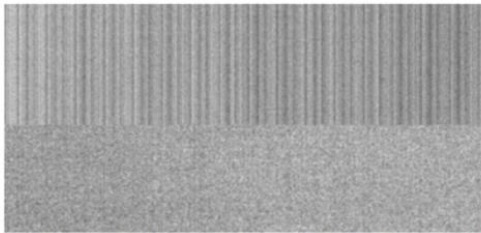
color image quality

The pco.dimax incorporates sophisticated techniques to achieve its high color image quality, proven and recommended by broadcast experts and camera men. This quality applies for high speed frame rates to shoot slow motion clips as well as for standard broadcast frame rates (such as 50 to 60 fps for HDTV 1080p).

A combination of special optical filters and an optimized color-calibration achieves an excellent sRGB image quality. According to ISO Standard 17321 the pco.dimax reaches quality grades of 83 SMI (matching high end digital cameras with typical 75 to 90 SMI). This can be seen by the typical test image sample in the figure, which shows a demanding scene for a correct Bayer pattern color conversion.



A typical test image with color checker, MTF test charts and challenging structures obtained with a color pco.dimax.



The top image shows the typical fixed pattern structures in the dark image of high speed CMOS image sensors, while the lower image shows the lower and more homogeneous noise in the dark image of a pco.dimax.

low light performance

The customized CMOS image sensor in combination with proprietary algorithms achieves an excellent dark signal non-uniformity (DSNU), which can be seen in the figure in a comparison of the dark image of a standard high speed CMOS image sensor and a dark image of the pco.dimax. Hence high quality images can also be recorded at low light sceneries. The low light performance is even further improved by the CDI mode, which is explained in the next section.

CDI

If structural information in the dark side of the histogram of the images is of major importance, the pco.dimax with its correlated double image (CDI) mode offers to record images with increased dynamic range and a 30% better performance on the weak signal side of the images (at the expense of half of the usual frame rate).



A bald eagle catches its prey - original resolution 1920 x 1080 © 500 frames/s (color version)

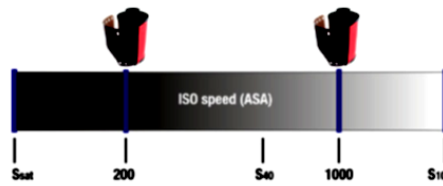
features



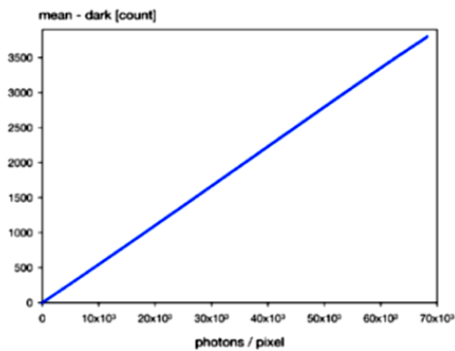
Crashtest, single extracted images of sequence - original resolution 2016 x 2016 © 1102 frames/s (color version)

light sensitivity & ISO speed

Compared to analog photographic films, which are limited to one light sensitivity value, the pco.dimax offers a range of sensitivities (displayed as a band in the figure) called ISO speeds, specified by the ISO Standard 12232. It defines the parameters s_{sat} , $s_{noise40}$ and $s_{noise10}$ for digital camera characterization. s_{sat} gives the maximum amount of light the sensor can process. $s_{noise40}$ defines "excellent" and $s_{noise10}$ "acceptable image quality". Both $s_{noise40}$ and $s_{noise10}$ are based on noise and quality image comparisons. Qualitatively speaking, the broader the band from s_{sat} to $s_{noise10}$ (see figure), the better the camera performance becomes. The pco.dimax provides image recording from ISO Speed 160, for highest quality, up to 16,000 and more at high frame rates.



The graph shows the ISO 12232 values s_{sat} , s_{40} and s_{10} relative to the formerly used sensitivity values for negative film (examples give ASA 200 and ASA 1000) along a virtual sensitivity scale.



EMVA 1288 linearity measurements of a pco.dimax.

linearity

For quantitative image measurements and analysis the linearity of the camera is a prerequisite. The EMVA 1288 linearity measurement results, as shown in the graph next to this text, demonstrate the scientific grade linearity that is a feature of the pco.dimax.

synchronization & trigger

A precise camera to camera synchronization for pco.dimax cameras is integrated by a master-slave mode with a remarkable low jitter (< 50 ns). Further a variety of trigger signals can be used for sequence as well as for single image triggering, allowing for low level, high level, differential and passive signals at the optically isolated inputs. Time code can be added by an IRIG-B signal (modulated or unmodulated). These features are extremely useful for stereo camera applications for 3D motion analysis and 3D particle image velocimetry (3D PIV) measurements.

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 22.18 mm x 22.18 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 cnts. rms @ 90 % center zone
PRNU	< 1 % @ 80 % signal

camera S1/S4

max. frame rate	4467 fps (mono) 4467 fps (color) S1 (full frame)
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 (mono) / 4479 (col.) 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)
interframing 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 .. 260 VAC (12 VDC opt.)
power consumption	80 W (120 W with battery ⁵)
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 table⁴

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

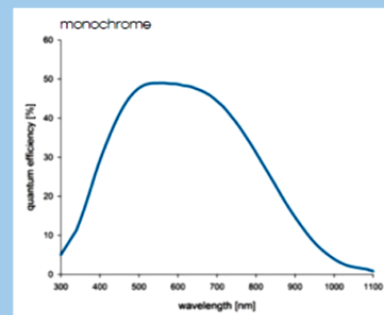
pco.dimax S1

1008 x 1008	4 467 (4 467) fps	25 037
528 x 528	12 932 (12 932) fps	91 208
480 x 240	27 642 (27 642) fps	222 518
240 x 16	152 811 (152 811) fps	6 675 542

pco.dimax S4

2016 x 2016	1 279 (1 102) fps	6 307
1920 x 1080	2 470 (2 128) fps	12 362
1296 x 720	5 085 (4 346) fps	27 471
1008 x 1008	4 467 (3 792) fps	25 037
480 x 240	27 642 (23 061) fps	222 518
240 x 16	152 811 (130 650) fps	6 675 542

quantum efficiency



- ¹ in correlated double image mode (CDI) the readout noise is reduced and therefore the intrasene dynamic is improved.
- ² all trigger input signals are optically isolated and various signal conditions can be selected like: low level TTL, high level TTL, differential (RS-485) and passive (contact closure).
- ³ time between two consecutive images for particle image velocimetry (PIV) applications
- ⁴ the given resolutions are selected for the frame rate calculations only, they are not mandatory. For region of interest conditions see table above.
- ⁵ includes charging current

technical data

software

For camera control, image acquisition and archiving of images in various file formats PCO provides the software application Camware (Windows XP, 7 and 8).

A camera SDK (software development kit) including a 32 / 64 bit dynamic link library for user customization and integration on PC platforms is available for free.

For a list of third party software supported, please visit www.pco.de

options

monochrome & color versions available; rechargeable battery packs; custom made versions

ISO speed rating^{1,2}

color (raw)	S _{sat}	160
	S _{noise, 40}	500
	S _{noise, 10}	3 200
color (NLM noise filtered)	S _{sat}	160
	S _{noise, 40}	1 250
	S _{noise, 10}	6 400
monochrome (raw)	S _{sat}	1 250
	S _{noise, 40}	2 500
	S _{noise, 10}	16 000
monochrome (raw & NLM noise filtered)	S _{sat}	1 250
	S _{noise, 40}	> 10 000
	S _{noise, 10}	> 50 000

Color

CIE Lab ΔE^3	average	< 2.4
SMI ⁴	ISO 17321	> 83
color space	sRGB / ITU-R	BT.709

¹ ISO 12232: Photography - Electronic still-picture cameras - Determination of ISO speed

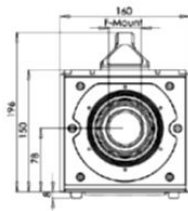
² measured with daylight 6000 K

³ using a Macbeth Colorchecker - 24 patches color

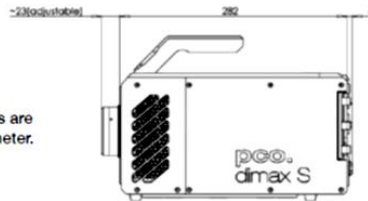
⁴ Sensitivity metamersim index (SMI) is defined in the ISO Standard 17321 and describes the ability of a camera to reproduce accurate colors using a Macbeth Colorchecker - 16 patches color

dimensions

F-mount lens changeable adapter.



All dimensions are given in millimeter.



camera views



Further information can be found on www.pco.de



applications

automobile safety tests



The recording of high speed sequences of safety tests is a requirement by law for car manufacturers. But more and more these recordings are as well used for 3D measurements to improve the modelling.

3D motion analysis



The deflation of a side-airbag under demanding light conditions was precisely recorded with a pco.dimax.

motion analysis



Nature documentation and super slow motion are a recent combination, which attracts people to watch and get new insights into animal life. Here ducklings were observed with a pco.dimax HD+ by Blue Paw Artists in Guyana.

material testing



A material test was recorded with two pco.dimax highspeed cameras in a stereo configuration. The exact synchronisation was important for the application. Courtesy of GOM Optical Measuring Techniques, Braunschweig, Germany.

physical science



The documentation and subsequent motion analysis are also important tools to improve space technology. Here the last shuttle start was recorded with two pco.dimax cameras. Courtesy of NASA, Florida, USA.

tv / broadcasting



For news and sport information on TV it is always interesting to show fast events in slow motion. Here the controlled blasting of old Bayernoil smokestacks (Ingolstadt, Germany) was recorded by a pco.dimax.

application areas

■ automobile safety tests ■ high speed particle image velocimetry (PIV) ■ material testing ■ tensile testing ■ airbag inflation ■ short time physics ■ hydrodynamics ■ spray analysis ■ motion analysis ■ TV / Broadcasting ■ combustion imaging ■ fast events in nature and machine vision ■ high speed inspection ■ hyper velocity impact studies ■ fast flow visualization ■ ballistics ■ fuel injection ■ slow motion in sports ■ 3D analysis of fast events ■ sparks in electrical switches ■ machine vision ■ ignition & injection research ■ high speed photogrammetry

europa

PCO AG
Donaupark 11
93309 Kelheim, Germany

+49 9441 2005 50
info@pco.de
pco.de

america

PCO-TECH Inc.
6930 Metroplex Drive
Romulus, Michigan 48174, USA

+1 248 276 8820
info@pco-tech.com
pco-tech.com

asia

PCO Imaging Asia Pte.
3 Temasek Ave
Centennial Tower, Level 34
Singapore, 039190

+65 6549 7054
info@pco-imaging.com
pco-imaging.com

china

Suzhou PCO Imaging
Technology Co., LTD
Suzhou (Jiangsu),
P.R. China

+86 512 67634
info@pco.cn
pco.cn

ADAM-6017

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



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.



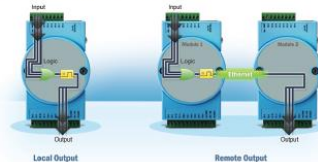
Peer-to-Peer

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.

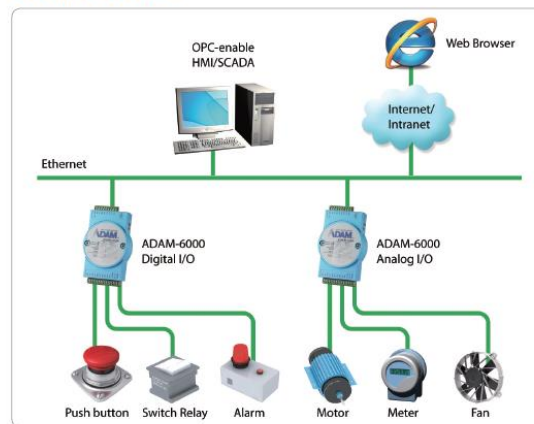


Graphic Condition Logic

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



Specifications

Analog Input

- Channels: 8 (differential)
- Resolution: 16-bit
- Sampling Rate: 10, 100 sample/second
- Input Type: mV, V, mA
- Input Range: $\pm 150\text{mV}$, $\pm 500\text{mV}$, $\pm 1\text{V}$, $\pm 5\text{V}$, $\pm 10\text{V}$, $*0\text{--}500\text{ mV}$, $*0\text{--}150\text{mV}$, $*0\text{--}1$, $*0\text{--}5\text{V}$, $*0\text{--}10\text{V}$, $0\text{--}20\text{ mA}$, $4\text{--}20\text{ mA}$, $*\pm 20\text{mA}$

Note! Input range with * is only supported by CE version

- Accuracy: $\pm 0.1\%$ (Voltage)
 $\pm 0.2\%$ (Current)
- Input Impedance: $> 10\text{M}\Omega$ (voltage)
 120Ω (current)
- Common-Mode Voltage: 350 V_{DC}

Digital Output

- Channels: 2
- Sink type: open collector to 30 V, 100 mA
- Output Delay: On: 100 μs
Off: 150 μs
- Over voltage protection (Max): 42 V_{DC}

General

- LAN: 10/100Base-T(X)
- Power Consumption: 2.7 W @ 24 V_{DC}
- Connectors: RJ-45 (Ethernet), Plug-in screw terminal block (I/O and power)
- Watchdog: System (1.6 second) and Communication (programmable)
- Power Input: 10 ~ 30 V_{DC}
- Dimensions (W x H x D): 70 x 122 x 27 mm
- Enclosure: PC
- Mounting: DIN 35 rail, stack, wall
- Supports Peer-to-Peer, GCL
- Supports User Defined Modbus Address
- Supports Modbus/TCP, TCP/IP, UDP, DHCP and HTTP Protocol

Protection

- Power Reversal Protection
- Isolation Protection: $2,000\text{ V}_{\text{DC}}$

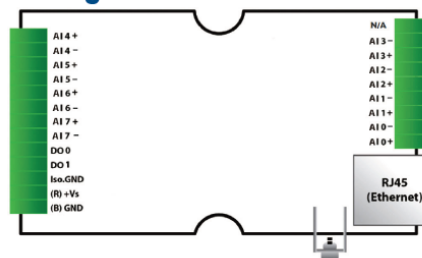
Environment

- Operating Temperature: $-20 \sim 70^\circ\text{C}$ ($-4 \sim 158^\circ\text{F}$)
- Storage Temperature: $-30 \sim 80^\circ\text{C}$ ($-22 \sim 176^\circ\text{F}$)
- Operating Humidity: 20 ~ 95% RH (non-condensing)
- Storage Humidity: 0 ~ 95% RH (non-condensing)

Software

- .NET Class Library (SDK) Windows and Windows CE Class Library, VB and VC# Sample Code for I/O Reading or Configuration and Communication
- Adam/Apax .NET Utility Network Setting, I/O Configuration, Data stream, P2P, GCL Configuration

Pin Assignment



Ordering Information

- ADAM-6017: 8-ch Isolated Analog Input Modbus TCP Module with 2-ch DO

Accessories

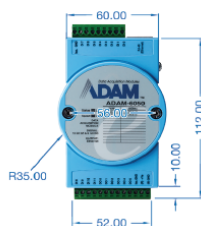
- PWR-242: DIN-rail Power Supply (2.1A Output Current)
- PWR-243: Panel Mount Power Supply (3A Output Current)
- PWR-244: Panel Mount Power Supply (4.2A Output Current)

Software

- PCLS-ADAMVIEW32: ADAMView Data Acquisition Software
- PCLS-OPC/MTP30: OPC Server for Modbus/TCP protocol

Dimensions

Unit: mm



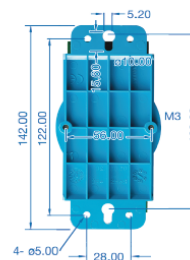
Front View



Side View

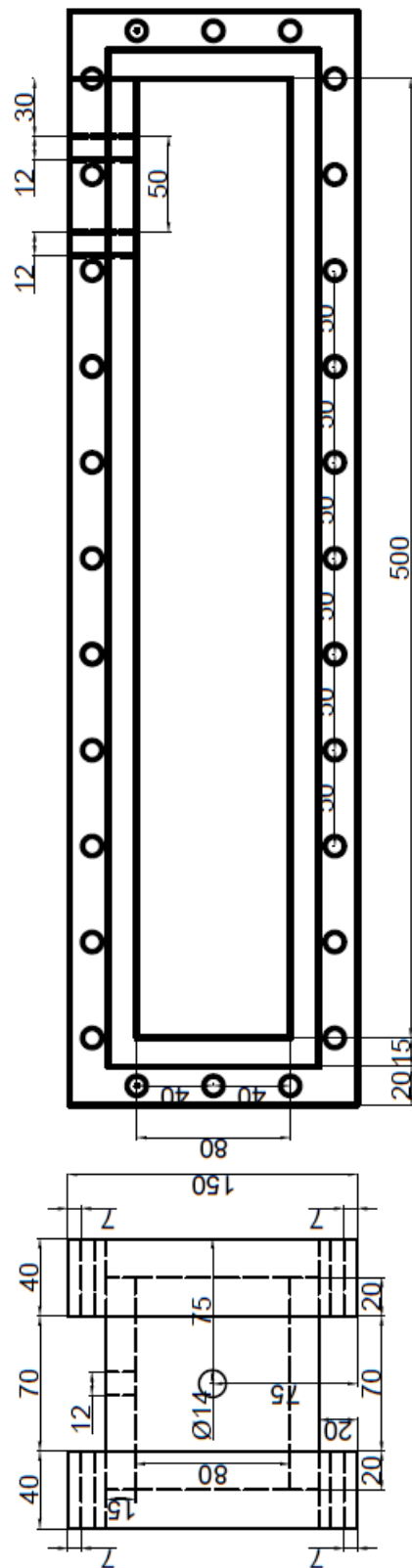


DIN-Rail Mounting Adapter



Wall Mounting Bracket

پیوست ص - نقشه‌ی بدنه محفظه احتراق به همراه اندازه‌گذاری بر حسب میلی‌متر



- [1] Xiao, H., (2016), PhD. thesis, “**Experimental and Numerical Study of Dynamics of Premixed Hydrogen-Air Flames Propagating in Ducts**” Springer, Berlin Heidelberg.
- [2] Friedman, R., and Burke, E., (1954), “**Measurement of Temperature Distribution in a Low-Pressure Flat Flame**” J. Chem. Phys., **22**(5), pp. 824–830.
- [3] Bychkov, V. V., and Liberman, M. A., (2000), “**Dynamics and Stability of Premixed Flames**” Phys. Rep., **325**(4–5), pp. 115–237.
- [4] Poinso, T., and Veynante, D., (2005), “**Theoretical and Numerical Combustion**” RT Edwards, Inc.
- [5] Lipatnikov, A., (2012), “**Fundamentals of Premixed Turbulent Combustion**” CRC Press.
- [6] Akkerman, V., (2007), “**Turbulent Burning, Flame Acceleration, Explosion Triggering**”.
- [7] Turns, S., (1996), “**An Introduction to Combustion**”, McGraw-hill New York.
- [8] Landau, L., and Lifshitz, E., (1987), “**Theoretical Physics, Vol. 6, Fluid Mechanics**”.
- [9] Dahoe, A. E., (2005), “**Laminar Burning Velocities of Hydrogen–Air Mixtures from Closed Vessel Gas Explosions**” J. Loss Prev. Process Ind., **18**(3), pp. 152–166.
- [10] Metghalchi, M., and Keck, J. C., (1980), “**Laminar Burning Velocity of Propane-Air Mixtures at High Temperature and Pressure**”, Combust. Flame, **38**, pp. 143–154.
- [11] Searby, G., (2006), “**Experimental Studies of Instabilities of Laminar Premixed Flames**”.
- [12] Knudsen, V., (2007), “**Hydrogen Gas Explosions in Pipelines-Modeling and Experimental Investigations**”.
- [13] Gaathaug, A., (2008), Master's thesis, “**Flame Propagation in a Transparent Pipe with a Single Obstruction**”.
- [14] Zhdanov, S., (1995), “**Nonlinear Theory of Kelvin-Helmholtz Instability**” Elsevier.
- [15] Warnatz, J., Maas, U., and Dibble, R. W., (2001), “**Combustion**”, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [16] Peters, N., (2000), “**Turbulent Combustion**”.
- [17] Mallard, E., and Le Chatelier, H. L., (1883), “**Thermal Model for Flame Propagation**” Ann. Mines, **4**(18), p. 379.
- [18] ELLIS, and C., O. C. de, (1928), “**Flame Movement in Gaseous Explosive Mixtures**”, J. Fuel Sci., **7**, pp. 502–508.
- [19] Jarosinski, J., and Veyssiere, B., (2009), “**Combustion Phenomena**”, *Selected Mechanisms of Flame Formation, Propagation and Extinction*.
- [20] Salamandra, G. D., Bazhenova, T. V., and Naboko, I. M., (1958), “**Formation of Detonation Wave during Combustion of Gas in Combustion Tube**”, Symp. Combust., **7**(1), pp. 851–855.
- [21] Clanet, C., and Searby, G., (1996), “**On the ‘Tulip Flame’ Phenomenon**”, Combust. Flame, **105**(95), pp. 225–238.
- [22] Huang, Z., Zhang, Y., Zeng, K., Liu, B., Wang, Q., and Jiang, D., (2006), “**Measurements of Laminar Burning Velocities for Natural Gas-Hydrogen-**

- Air Mixtures**", Combust. Flame.
- [23] MARKSTEIN, G. H., (1964), "**Experimental Studies of Flame-Front Instability**", AGARDograph, **75**, pp. 75–105.
- [24] Dunn-Rankin, D., Barr, P. K., and Sawyer, R. F., (1986), "**Numerical And Experimental Study Of 'Tulip' Flame Formation In A Closed Vessel**", Twenty-first Symp. Combust., **21**(1), pp. 1291–1301.
- [25] Dunn-Rankin, D., and Sawyer, R. F., (1998), "**Tulip Flames: Changes in Shape of Premixed Flames Propagating in Closed Tubes**", Exp. Fluids, **24**(2), pp. 130–140.
- [26] Kadowaki, S., and Hasegawa, T., (2005), "**Numerical Simulation of Dynamics of Premixed Flames: Flame Instability and Vortex-Flame Interaction**", Prog. Energy Combust. Sci., **31**(3), pp. 193–241.
- [27] Shelkin, K., (1940), "**Influence of tube non-uniformities on the detonation ignition and propagation in gases**", JETP10. 823–827.
- [28] Bychkov, V., Petchenko, A., Akkerman, V., and Eriksson, L. E., (2005), "**Theory and Modeling of Accelerating Flames in Tubes**" Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys., **72**(4), pp. 1–10.
- [29] Williams, F. A., (1985), "**Combustion Theory**", *Cummings Publ. Co.*
- [30] Matalon, M., and Metzener, P., (1997), "**The Propagation of Premixed Flames in Closed Tubes**" J. Fluid Mech., **336**, pp. 331–350.
- [31] Bychkov, V., Akkerman, V., Fru, G., Petchenko, A., and Eriksson, L.-E., (2007), "**Flame Acceleration in the Early Stages of Burning in Tubes**", Combust. Flame, **150**(4), pp. 263–276.
- [32] Valiev, D., Bychkov, V., Akkerman, V., Law, C. K., and Eriksson, L.-E., (2012), "**Flame Acceleration in Channels with Obstacles in the Deflagration-to-Detonation Transition**", Combust. Flame, **157**(5), pp. 1012–1021.
- [33] Akkerman, V., Bychkov, V., Petchenko, A., and Eriksson, L. E., (2006), "**Flame Oscillations in Tubes with Nonslip at the Walls**", Combust. Flame, **145**(4), pp. 675–687.
- [34] Gonzalez, M., (1996), "**Acoustic Instability of a Premixed Flame Propagating in a Tube**" Combust. Flame, **107**(3), pp. 245–259.
- [35] Matalon, M., (2009), "**Flame Dynamics**" Proc. Combust. Inst., **32 I**(1), pp. 57–82.
- [36] Xiao, H., Wang, Q., He, X., Sun, J., and Shen, X., (2011), "**Experimental Study on the Behaviors and Shape Changes of Premixed Hydrogen-Air Flames Propagating in Horizontal Duct**", Int. J. Hydrogen Energy, **36**(10), pp. 6325–6336.
- [37] Xiao, H., Duan, Q., Jiang, L., and Sun, J., (2014), "**Effects of Ignition Location on Premixed Hydrogen/Air Flame Propagation in a Closed Combustion Tube**", Int. J. Hydrogen Energy, **39**(16), pp. 8557–8563.
- [38] Xiao, H., Houim, R. W., and Oran, E. S., (2017), "**Effects of Pressure Waves on the Stability of Flames Propagating in Tubes**", Proc. Combust. Inst., **36**(1), pp. 1577–1583.
- [39] Xiao, H., Shen, X., and Sun, J., (2012), "**Experimental Study and Three-Dimensional Simulation of Premixed Hydrogen/Air Flame Propagation in a Closed Duct**", Int. J. Hydrogen Energy, **37**(15), pp. 11466–11473.
- [40] 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**", Combust. Flame, **159**(4), pp. 1523–1538.
- [41] Xiao, H., Wang, Q., He, X., Sun, J., and Yao, L., (2010), "**Experimental and**

- Numerical Study on Premixed Hydrogen/Air Flame Propagation in a Horizontal Rectangular Closed Duct**", *Int. J. Hydrogen Energy*, **35**(3), pp. 1367–1376.
- [42] Xiao, H., Mao, Z. L., An, W. G., Wang, Q. S., and Sun, J. H., (2013), "**Numerical Simulation of Premixed Propane/Air Flame Propagation Using a Dynamically Thickened Flame Approach**", *Appl. Mech. Mater.*, **444–445**, pp. 1574–1578.
- [43] 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*, **42**(8), pp. 5426–5438.
- [44] Shen, X., Wang, Q., Xiao, H., and Sun, J., (2012), "**Experimental Study on the Characteristic Stages of Premixed Hydrogen-Air Flame Propagation in a Horizontal Rectangular Closed Duct**", *Int. J. Hydrogen Energy*, **37**(16), pp. 12028–12038.
- [45] Shen, X., He, X., and Sun, J., (2015), "**A Comparative Study on Premixed Hydrogen–Air and Propane–Air Flame Propagations with Tulip Distortion in a Closed Duct**", *Fuel*, **161**, pp. 248–253.
- [46] 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. Mater.*, **327**, pp. 116–126.
- [47] Chen, P., Huang, F., and Sun, Y., (2017), "**Effects of Metal Foam Meshes on Premixed Methane-Air Flame Propagation in the Closed Duct**", *J. Loss Prev. Process Ind.*, **47**, pp. 22–28.
- [48] 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.*, **35**(2), pp. 185–191.
- [49] Wan, S., Yu, M., Zheng, K., Wang, C., Yuan, Z., and Yang, X., (2019), "**Effect of Side Vent Size on a Methane/Air Explosion in an End-Vented Duct Containing an Obstacle**", *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **101**(April 2018), pp. 141–150.
- [50] Wen, X., Yu, M., Liu, Z., Li, G., Ji, W., and Xie, M., (2013), "**Effects of Cross-Wise Obstacle Position on Methane e Air de Fl Agration Characteristics**", *J. Loss Prev. Process Ind.*, pp. 6–11.
- [51] Chen, P., Guo, S., Li, Y., and Zhang, Y., (2017), "**Experimental and LES Investigation of Premixed Methane/Air Flame Propagating in a Tube with a Thin Obstacle**", *Combust. Theory Model.*, **21**(2), pp. 274–292.
- [52] Chen, P., Luo, G., Sun, Y., and Lv, Q., (2018), "**Impacts of Plate Slits on Flame Acceleration of Premixed Methane/Air in a Closed Tube**", *J. Energy Inst.*, **91**(4), pp. 563–572.
- [53] Chen, P., Sun, Y., Li, Y., and Luo, G., (2017), "**Experimental and LES Investigation of Premixed Methane/Air Flame Propagating in an Obstructed Chamber with Two Slits**", *J. Loss Prev. Process Ind.*, **49**, pp. 711–721.
- [54] خسروی الحسینی م، معرفت م، مظاهری ک. (۱۳۸۷)، "مدلسازی عددی مشعل متخلخل استوانه ای با انتقال حرارت جانبی"، *212*(4)، pp. 29–43.
- [55] معرفت م، آسترکی م، خسروی الحسینی و، (۱۳۹۰)، "بررسی بهبود عملکرد مشعل متخلخل با جریان شعاعی در مقایسه با مشعل های متخلخل جریان محوری"، *علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک*, **1**(1) p. 23.

- [56] شعبانی نژاد ه. گنجعلیخان نسب ع.، جهانشاهی جواران ا.، (۲۰۱۸)، “آنالیز سه بعدی یک مشعل متخلخل تابشی در شرایط کارکرد مختلف همراه با مدلسازی پدیده احتراق” Modares Mech. Eng., 17(12), pp. 105–113.
- [57] کلاهدوز ح، خادم ج.، (۱۳۹۰)، “تحلیل اثر تعداد و موقعیت اورفیس بر فرآیند گذر از احتراق به انفجار” نوزدهمین همایش سالانه مهندسی مکانیک.
- [58] Askari, O., Hannani, S. K., and Ebrahimi, R., (2012), “**Improvement and Experimental Validation of a Multi-Zone Model for Combustion and NO Emissions in CNG Fueled Spark Ignition Engine**” J. Mech. Sci. Technol., 26(4), pp. 1205–1212.
- [59] Askari, O., Metghalchi, H., Moghaddas, A., Hannani, S. K., Ebrahimi, R., Kazemzadeh Hannani, S., and Hemmati, H., (2013), “**Fundamental Study of Spray and Partially Premixed Combustion of Methane/Air Mixture**” J. Energy Resour. Technol., 135(2), p. 021001.
- [60] Askari, O., Metghalchi, H., Kazemzadeh Hannani, S., Hemmati, H., and Ebrahimi, R., (2014), “**Lean Partially Premixed Combustion Investigation of Methane Direct-Injection Under Different Characteristic Parameters**” J. Energy Resour. Technol., 136(2), p. 022202.
- [61] Askari, O., Vien, K., Wang, Z., Sirio, M., and Metghalchi, H., (2016), “**Exhaust Gas Recirculation Effects on Flame Structure and Laminar Burning Speeds of H₂/CO/Air Flames at High Pressures and Temperatures**” Appl. Energy, 179, pp. 451–462.
- [62] Zare, S., Roy, S., El Maadi, A., and Askari, O., (2019), “**An Investigation on Laminar Burning Speed and Flame Structure of Anisole-Air Mixture**” Fuel, 244, pp. 120–131.
- [63] Askari, O., Wang, Z., Vien, K., Sirio, M., and Metghalchi, H., (2017), “**On the Flame Stability and Laminar Burning Speeds of Syngas/O₂/He Premixed Flame**” J. Fuel, 190, pp. 90–103.
- [64] Askari, O., Moghaddas, A., Alholm, A., Vein, K., Alhazmi, B., and Metghalchi, H., (2016), “**Laminar Burning Speed Measurement and Flame Instability Study of H₂/CO/Air Mixtures at High Temperatures and Pressures Using a Novel Multi-Shell Model**” Combust. Flames, 168, pp. 20–31.
- [65] Lee, D. K., In, J., and Lee, S., (2015), “**Standard Deviation and Standard Error of the Mean**” Korean J. Anesthesiol., 68(3), pp. 220–3.
- [66] Carter, R. E., (2013), “**A Standard Error: Distinguishing Standard Deviation from Standard Error**” Diabetes, 62(8), p. e15.
- [67] Ponizy, B., Claverie, A., and Veysi re, B., (2014), “**Tulip Flame-the Mechanism of Flame Front Inversion**” Combust. Flame, 161(12), pp. 3051–3062.

Abstract

Considering the importance of combustion of gases, which is an important issue in the field of production, transfer and exploitation of gases, it is very important to study and predict the flame behaviour and the conditions affecting it. Flame behaviour in a closed environment is more complicated than open combustion, so focusing on this process requires special attention. Under conditions, if a source of poor energy is sparked inside a pre-mixed gas mixture, the flame front is formed and the combustion process begins. As a result of the conditions, including the turbulence of the flow and the boundary conditions of the walls, the flame can slowly flame and finally become detonation, which is a very destructive and dangerous phenomenon. The process of propagation of the flame front inside the gas mixture depends on the type of flow and the chemical nature of the gas and the governing boundary conditions, which causes various instabilities in the flame front, and the velocity of the flame front depends heavily on this. According to the previous studies in the relevant section, the effect of the porous medium on the combustion flow and flame front, including pressure variations, burning rate and the structure of the flame front, have been studied. The present study is an experimental study of the propagation of the flame methane-air stoichiometric mixture in a closed duct and the effect of the porous medium on the structure of the flame front and the parameters affecting its propagation. The effects of porous obstacles in the flame growth path and flow field have been studied in a closed duct experimentally. The effect of porous obstacles with solid to its different heights has also been studied. To focus on the effects of the porous obstacle, a sample of solid obstacle selected from wood is also studied. The results reflect the fact that the amount of turbulence created in the flow field by porous obstacles increases the velocity of the flame propagation within the canal and generally maintains the initial positive flame acceleration relative to the state without a barrier, for longer periods and in some cases causes Increased flame acceleration also. Porous medium in the comparison with the solid medium has a special property that is visible in the results and it prevents the exacerbation of the compressive waves generated by the combustion process in the flow field. It is seen that they have been reinforced in the solid obstacle of compressive waves. Increasing the height of the porous obstacle has increased the turbulence in the flow field and changed the structure of the propagation of the flame front. In the case of pressure variations inside the enclosure, the presence of obstacles also had a significant effect, which reduced the maximum pressure inside the enclosure. Of course, it is noteworthy that porous obstacle had a lower impact on the maximum pressure produced inside the compartment than the solid obstacle. The change in the height of the porous obstacle is also generally developed with increasing height, the maximum pressure produced inside the close duct, in a shorter time.

Keywords: methane-air mixture; closed duct; porous obstacle; solid obstacle.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

PhD Dissertation in Energy Conversion Engineering

**Experimental study of The Effect of Porous Obstacle on
Premixed Methane-Air Flame Propagation in a Closed Duct**

By: Habib Kolahdooz

Supervisor:
Dr. M.H. Kayhani
Dr. M. Nazari

Adviser
Dr. R. Ebrahimi

July 2019