

بررسی تجربی آتشزنه تورچ متان - اکسیژن: بررسی اثر نسبت هم ارزی و دبی جرمی بر طول شعله

مسعود عیدی عطارزاده^{۱*}، محمد فهیم^۲

۱- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، eidiattar@ut.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، m.fahim1372@gmail.com

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۴/۰۶/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷)

چکیده

در این مقاله، اثر دبی جرمی کل و نسبت هم‌ارزی بر طول شعله و ویژگی‌های احتراق در محفظه آتشزنه تورچ با سوخت متان و اکسیژن گازی بررسی می‌شود. با توسعه الگوریتم پردازش تصویر، نواحی شعله و ناحیه اشباع نور شناسایی شده و طول آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. آزمایش‌ها در دو حالت انجام می‌شود: بررسی اثر تغییر دبی جرمی کل و بررسی اثر تغییر نسبت هم‌ارزی. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دبی جرمی در نسبت هم‌ارزی ثابت موجب افزایش لگاریتمی طول شعله و ناحیه اشباع می‌شود. همچنین، افزایش نسبت هم‌ارزی در دبی ثابت، طول شعله و طول ناحیه اشباع را به ترتیب تا ۱۳۰ و ۲۵۰ درصد افزایش می‌دهد. به طور کلی، نتایج بیانگر آن است که تغییرات نسبت هم ارزی، تأثیر بیشتری بر طول شعله دارد. این نتایج می‌تواند در بهینه‌سازی طراحی آتشزنه تورچ و بهبود عملکرد سیستم‌های احتراق با سوخت متان کاربرد داشته باشد.

کلید واژگان: آتشزنه، تورچ، جرقه تقویت شده، طول شعله، متان-اکسیژن.

مقدمه

توسعه آتشزنه‌های تورچ برای کاربردهای هوافضایی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا این نوع آتشزنه‌ها نقش حیاتی در ایجاد احتراق قابل اعتماد در موتورهای ماهواره‌بر ایفا می‌کنند. آتشزنه‌های تورچ به‌عنوان یک جزء کلیدی در سیستم‌های پیشران ماهواره‌بر شناخته می‌شوند که انرژی اولیه لازم برای احتراق مخلوط اصلی پیشران را فراهم می‌کنند [۱]. عملکرد یک آتشزنه تورچ به توانایی آن در تولید شعله‌ای پایدار و ثابت در شرایط عملیاتی مختلف بستگی دارد. مطالعات پیشین به بررسی طرح‌ها و پیکربندی‌های مختلفی برای بهینه‌سازی عملکرد آتشزنه‌ها پرداخته‌اند. امروزه پیشران اکسیژن-متان به‌عنوان گزینه‌ای با پتانسیل بالا برای نسل بعدی ماهواره‌برهای عملیاتی در نظر گرفته می‌شود [۲]. در مأموریت‌های هوافضایی آینده که به انعطاف‌پذیری دینامیکی بالا نیاز دارند، موتورهای راکتی باید توانایی چندین بار روشن و خاموش شدن را داشته باشند [۳، ۱].

یکی از جنبه‌های کلیدی طراحی آتشزنه تورچ، نرخ جریان جرمی در محفظه اصلی به‌عنوان تابعی از تعداد انژکتورهای پاشش است. این پارامتر به‌طور قابل توجهی بر اشتعال‌پذیری و عملکرد کلی آتشزنه تأثیر می‌گذارد. نیوا و همکاران یک آتشزنه تورچ برای موتورهای سوخت مایع با انژکتورهای هم‌محور و پیشران LOX/LH2 پیشنهاد کردند که قادر به ایجاد احتراق پایدار در محفظه احتراق است [۴].

یکی از ملاحظات مهم در طراحی، اختلاط مطلوب سوخت و اکسیدکننده است. سانچز و همکاران با ایجاد یک آتش‌زنه تورچ با شعله پیش‌مخلوط نشان دادند که این نوع از آتش‌زنه‌ها دستیابی به احتراق پایدار را به راحتی ممکن می‌سازند. همچنین با در نظر گرفتن اوریفیس‌ها در مسیر جریان سوخت و اکسیدکننده، تطبیق‌پذیری این نوع آتش‌زنه را برای هندسه‌ها و شرایط عملیاتی مختلف مانند فشار محفظه اصلی، نرخ جریان اصلی موتور و غیره ممکن ساختند. این امر نهایتاً با توجه به تطبیق‌پذیری برای شرایط مختلف می‌تواند به کاهش جرم موتور نیز منتج شود [۵]. این گروه ابتدا کار خود را با استفاده از واکنش‌دهنده‌های گازی انجام دادند. سپس به تدریج در کارهای بعدی موفق به انجام آزمایش‌های موفق با اکسیدکننده مایع شدند. با این وجود استفاده از مولفه مایع همواره عدم‌قابلیت اطمینان را به همراه داشته است و این امر یکی از چالش‌های بزرگ و پیش‌رو در مسیر توسعه این نوع آتش‌زنه‌ها است.

پاولی و همکاران [۶] علاوه بر استخراج نقشه پایداری، شرایطی که شعله به خروجی آتش‌زنه می‌چسبد و جدا می‌شود را نیز مشاهده و ثبت کرده‌اند. عدم اتصال شعله آتش‌زنه به تورچ نشانگر ناپایداری جریان و احتمال خاموشی آن در معرض جریان واکنش‌دهنده‌های محفظه اصلی خواهد بود.

در استندهای آزمایشگاهی، مارشال و همکاران برای شبیه‌سازی شرایط خلأ، سیستم آتش‌زنه را درون یک کپسول با حجم مشخص و با قابلیت ایجاد خلأ نصب کردند. این امر به‌ویژه برای شبیه‌سازی مأموریت‌های ارتفاع‌بالا و روشن شدن موتورهای مرحله دوم و سوم اهمیت بالایی داشت [۷].

در محفظه‌های تورچ از یک شمع الکتریکی با ولتاژ بالا نیز استفاده می‌شود که می‌تواند به‌نوبه خود سبب ایجاد چالش‌های خاصی شود. به‌عنوان نمونه، فیشر و همکاران [۸] بیان کردند که وجود ولتاژ بالا در سیستم آتش‌زنه ممکن است به‌لحاظ اختلال بر روی سایر سیستم‌های کنترلی و برقی پرتابه تأثیر منفی بگذارد و به‌همین‌اساس لازم است تمهیداتی اندیشیده شود. یاماگوچی و همکاران [۹] با ارائه یک مدل تحلیلی، بررسی‌های خود را بر تأثیر میدان انتقال حرارت بر ضریب تخلیه انژکتورهای سوخت و اکسیدکننده استوار کردند. آن‌ها دریافتند که هدررفت حرارتی دیواره نسبت به شرایط آدیاباتیک سبب کاهش ۷ درصدی ضریب تخلیه انژکتورها می‌شود. آن‌ها با بررسی وجود شرایط واکنش تعادلی در مدل ریاضی خود و مقایسه آن با نتایج تجربی نیز بیان کردند که فرض تعادل شیمیایی با واقعیت تجربی تطابق مناسبی دارد.

در شعله‌های غیرپیش‌مخلوط، طول شعله از پارامترهای عملکردی مهم محسوب می‌شود. سان و همکاران مطالعه جامعی بر روی طول شعله داشته‌اند [۱۰]. وو و همکاران [۱۱] با انجام عکس‌برداری تجربی از رادیکال‌های OH و CH معیارهایی برای طول شعله را بررسی کردند. آتش‌زنه تورچ این گروه در بازه نسبت هم‌ارزی ۰/۲ تا ۱/۴، عملکرد مناسبی نشان داد. در نهایت نشان داده شده است که با افزایش دبی جرمی و نسبت هم‌ارزی، به‌طور مستقیم طول شعله نیز افزایش می‌یابد.

کازواکی در دانشگاه کالیفرنیا دیویس یک آتش‌زنه تورچ هیدروژن-اکسیژن طراحی کرده‌اند. آن‌ها از این تورچ برای روشن کردن سوخت جامد استفاده کردند. کازواکی با تغییر دبی هیدروژن همبستگی ویژگی‌های هندسی، مانند طول شعله، را بررسی کرد. او دریافت که با حرکت به سمت نسبت استوکیومتری، همبستگی خطی نیز افزایش می‌یابد و با دور شدن (به سمت غنی و فقیر از سوخت) همبستگی خطی نیز تضعیف می‌شود. با این وجود، او دریافت که در شرایط غنی سوخت، ناپایداری و در نتیجه تضعیف همبستگی خطی بسیار قوی‌تر عمل می‌کند. این رفتار کاملاً مشابه آن چیزی است که در مراجع، به‌عنوان رفتار شعله آشفته گزارش شده است. موارد مشابهی نیز در پژوهش حاضر دیده شده است که در ادامه ارائه خواهد شد [۱۲، ۱۳].

چاغاتای اوز یک آتش‌زنه تورچ هیدروژن-اکسیژن، را به صورت تجربی و عددی تحلیل کرده‌اند. این پژوهش، طول شعله به‌عنوان پارامتر عملکردی مهم ذکر شده است. او دریافت که تغییر نسبت اکسیدکننده به سوخت، تأثیر بیشتری نسبت به تغییرات نرخ جریان جرمی کل بر طول مؤثر شعله و انرژی حرارتی خروجی دارد. او نشان داد که تقریباً با دو برابر کردن نسبت

اکسیژن به سوخت (۴۰ به ۷۵)، طول شعله به همان اندازه‌ای افزایش می‌یابد که فشار سیستم تغذیه از ۲۰ به ۵۰ بار تغییر کند [۱۴].

کولاخمتوف و همکاران دو طراحی مختلف را برای تورچ هیدروژن-اکسیژن پیاده‌سازی کردند. در طرح اول، با تشکیل شعله در داخل تورچ، آسیب به تجهیزات آتش‌زنه رخ داد، اما به تدریج با تغییر طراحی و محل شمع جرقه‌زن، شعله به سمت بیرون تورچ حرکت می‌کند و همین امر سبب ایجاد قابلیت اطمینان برای یک تست دو ثانیه‌ای شد. همچنین با تغییر ساختار انژکتورها و تنظیم اندازه آن‌ها، کوشیدند در ایجاد شعله در نزدیکی الکتروود شمع جرقه‌زن تاخیر ایجاد کنند. برای این کار، فشار انژکتورها به گونه‌ای تنظیم شد که سرعت جریان محوری (اکسیژن) افزایش یابد [۱۵].

اونروه و همکاران [۱۶] یک سیستم آزمایشگاهی برای ارزیابی عملکرد یک تورچ با سوخت متان گازی و اکسیژن گازی در محیط‌های کم‌فشار را طراحی و آزمایش کردند. این مطالعه با هدف شبیه‌سازی شرایط اشتعال در ارتفاعات بالا (معادل ۰/۱ بار) انجام شد و بر قابلیت اطمینان اشتعال در فشارهای کم تمرکز داشت. نتایج نشان می‌دهد که با طراحی صحیح، فشار محیط بیرون چندان بر مشخصات احتراق داخلی تأثیر زیادی نخواهد داشت با این حال، با تصویربرداری پرسرعت و کاهش فشار به کمتر از ۱۰ psi، شعله دچار گسترش و توسعه بیشتر خواهد شد.

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در مطالعات پیشین، اگرچه تحقیقات متعددی بر روی آتش‌زنه‌های تورچ متان-اکسیژن انجام شده است، اغلب این پژوهش‌ها بر ارزیابی کیفی یا قابلیت اطمینان اشتعال متمرکز بوده و کمتر به تحلیل کمی هم‌زمان طول شعله و ناحیه اشباع در شرایط کاری مختلف پرداخته‌اند. در این مقاله، یک آتش‌زنه تورچ متان-اکسیژن طراحی و ساخته شده و به صورت تجربی تحت دو سناریوی اصلی مورد آزمون قرار می‌گیرد: (۱) نسبت هم‌ارزی ثابت با تغییر دبی جرمی کل، و (۲) دبی جرمی کل ثابت با تغییر نسبت هم‌ارزی. نوآوری این کار در استفاده از یک الگوریتم پردازش تصویر اختصاصی برای اندازه‌گیری دقیق طول شعله و ناحیه اشباع و تحلیل ارتباط ساختاری آن‌ها با پارامترهای عملکردی است که می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی و ارتقای عملکرد سامانه‌های احتراقی متان‌سوز کمک کند.

بستر آزمون

با توجه به اهداف تجربی تعیین‌شده، یک آتش‌زنه تورچ طراحی شده است. شکل ۱ نمایی از این آتش‌زنه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، ورودی اکسیدکننده به صورت محوری طراحی شده و سوخت از طریق چهار ورودی مماسی وارد می‌شود. برای هر دو جریان، پیش از ورود به محفظه تورچ، شیرهای یکسوکنده به منظور جلوگیری از بازگشت جریان نصب شده است. همچنین، برای اندازه‌گیری دمای بدنه از سنسور دما و برای اندازه‌گیری فشار ایجاد شده در داخل محفظه احتراق از سنسور فشار استفاده شده است. سنسور دما از نوع K با دامنه دمایی ۲۰- تا ۱۰۰۰+ درجه سانتی‌گراد و دقت ۱ درجه است. سنسور فشار نیز از نوع استرین‌گیج برند Madeco با دامنه فشار ۰-۲۵ بار و دقت ۰/۵٪ FSD است.

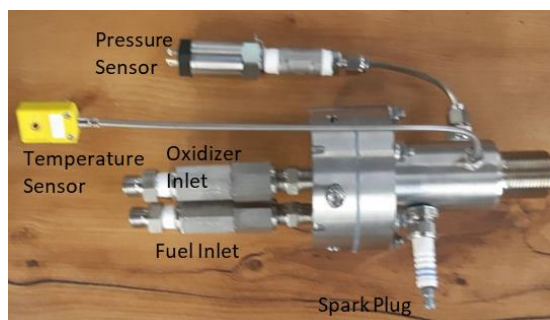


Figure 1: Designed torch igniter under study along with spark plug and sensors

شکل ۱- محفظه آتش‌زنه طراحی شده به همراه شمع جرقه‌زن و سنسورها

مدار سیستم تغذیه و داده‌برداری در شکل ۲ نشان داده شده است. فشار خروجی از مخزن اکسیژن و متان توسط رگلاتور تنظیم می‌شود. دما و فشار در هر یک از خطوط فوق اندازه‌گیری می‌شود. سنسور دما از نوع PT100 با دامنه -۴۰ تا +۵۰ درجه سانتی‌گراد است و سنسور فشار نیز از نوع استرین‌گیج برند Madeco با دامنه فشار ۰-۲۵ بار و دقت ۰.۵٪ FSD است. در هر یک از خطوط، نازل صوتی قرار داده شده است و با استفاده از دما و فشار بالادست آن، دبی گاز محاسبه می‌شود.

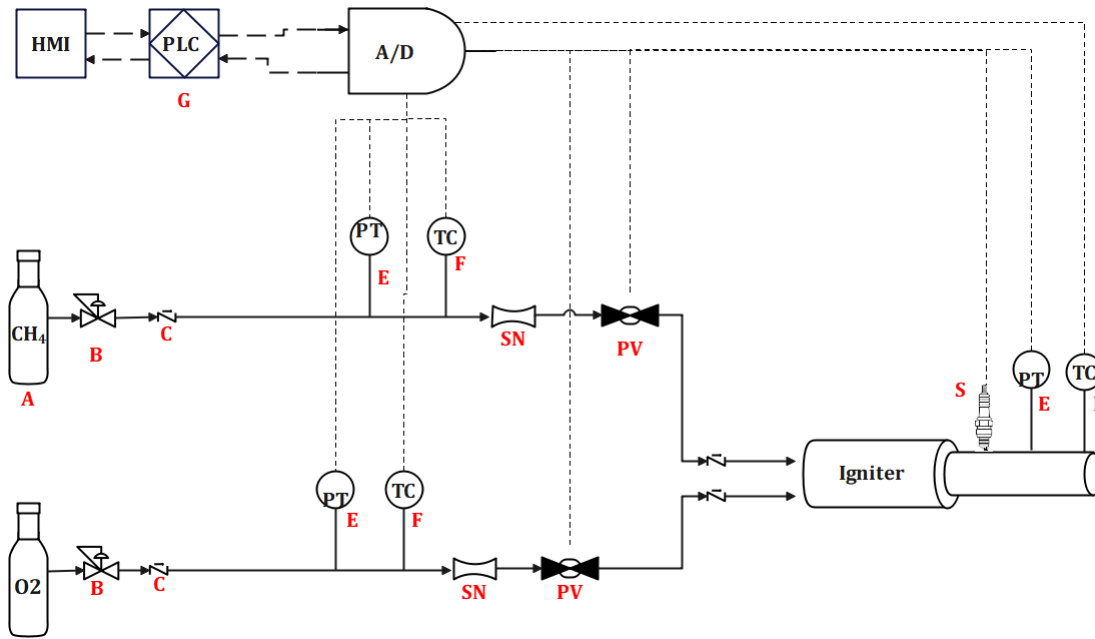


Figure 2 – Schematic of the feed system including: (A) tank, (B) regulator, (C) check Valve, (SN) sonic nozzle, (PV) pneumatic valve, (E) pressure sensor, (F) thermocouple, (S) spark plug, and (G) data acquisition unit (A/D + PLC + HMI).

شکل ۲- نقشه خطوط تغذیه شامل (A) مخزن، (B) رگولاتور، (C) یکسوکننده، (SN) نازل صوتی، (PV) شیرپنوماتیک، (E) سنسور فشار، (F) ترموکوپل، (S) شمع جرقه‌زن و (G) واحد داده‌برداری (A/D+PLC+HMI)

توالی عملکرد شیرها و شمع جرقه‌زن در شکل ۳ نشان داده شده است. به‌طور کلی، به منظور عملکرد ایمن آتش‌زنه، شمع جرقه‌زن همواره در زمان تست روشن است. در مرحله بعد، جریان اکسیدکننده و در نهایت جریان سوخت به منظور ایجاد احتراق برقرار می‌شود. لازم به ذکر است که ترتیب خاموشی دقیقاً برعکس فرآیند روشن شدن است.

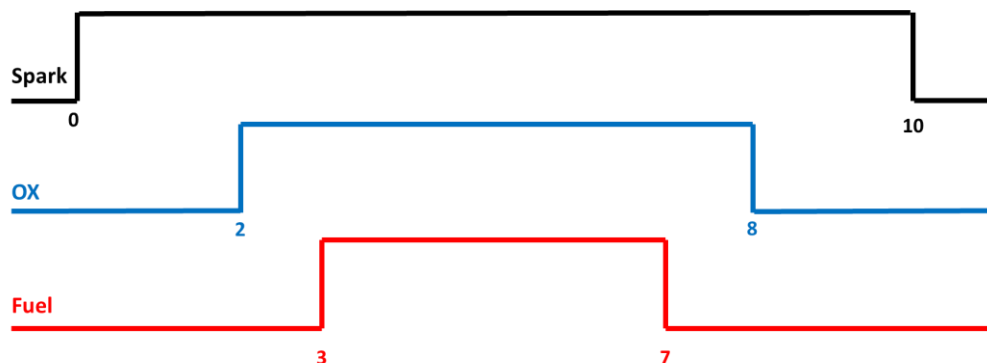


Figure 3- Functional timing sequence of the torch igniter.

شکل ۳- زمانبندی عملکردی آتش‌زنه

پردازش تصویر

به منظور تحلیل و بررسی نتایج، یک کد پردازش تصویر توسعه داده شده است. این کد بر اساس شدت نور ثبت شده در تصویر، ناحیه شعله را مشخص می‌کند. بدین منظور، هر تصویر در راستای طول به ۶ قسمت تقسیم شده و در هر قسمت، با استفاده از تابع imbinarize از نرم‌افزار متلب، مرز شعله تشخیص داده می‌شود. بر اساس آزمایش‌های انجام شده، مرز شعله با حداکثر ۵ پیکسل خطا تشخیص داده می‌شود. ابعاد هر تصویر برابر با 1440×1440 پیکسل بوده و طول هر تصویر ۵۳۰ میلی‌متر است. بنابراین طول هر پیکسل برابر با $0/37$ میلی‌متر است. لذا دقت تشخیص مرز شعله برابر با $1/8$ میلی‌متر است. بر این اساس می‌توان گفت که دقت اندازه‌گیری طول شعله با استفاده از این روش پردازش، برابر با ± 2 میلی‌متر است. طول شعله مورد بررسی بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر متغیر بوده و لذا دقت اندازه‌گیری طول شعله، کمتر از ۱٪ است.

نمونه‌ای از تشخیص ناحیه شعله در شکل ۴ ارائه شده است. با قرار دادن آتش‌زنه در محیط تاریک و پس‌زمینه سیاه، نواحی که دارای شدت رنگ قابل توجهی هستند، شعله محسوب می‌شوند و بر همین اساس می‌توان طول آن را محاسبه کرد. علاوه بر این، یک ناحیه کوچکتر نیز با خط چین مشخص شده است. این ناحیه در واقع مکان هندسی نقاطی است که شدت نور در آن‌ها اشباع است. در شعله‌های نیمه‌پیش‌مخلوط^۱ با نسبت هم‌ارزی بالاتر از ۱، دو ناحیه احتراقی پیش‌مخلوط و غیرپیش‌مخلوط تشکیل شده که همانند شکل ۴، ناحیه پیش‌مخلوط با دما و شدت تشعشع بالا درون ناحیه غیرپیش‌مخلوط قرار می‌گیرد [۱۷]. ناحیه اشباع، معرف ناحیه پیش‌مخلوط شعله است.

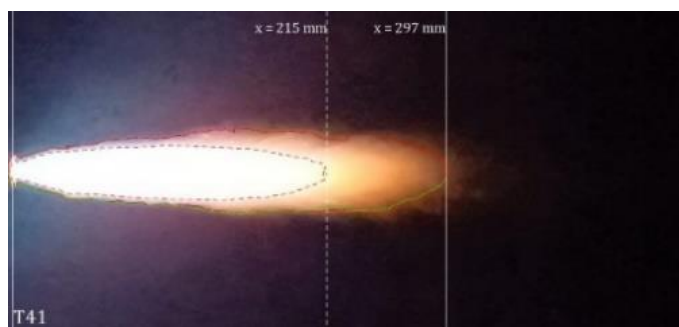


Figure 4- An example of flame-image processing using the developed image processing algorithm.

شکل ۴- نمونه‌ای از پردازش تصویر شعله با استفاده از الگوریتم توسعه یافته پردازش تصویر

نتایج

به منظور بررسی عملکرد محفظه آتش‌زنه تورچ، دو سری آزمایش در نظر گرفته شده است. در سری اول، اثر تغییر دبی جرمی کل در نسبت هم‌ارزی ثابت و در دسته دوم، اثر تغییر نسبت هم‌ارزی با ثابت نگه‌داشتن یک دبی جرمی مشخص بررسی شده است. در هر دو دسته‌بندی، با استفاده از الگوریتم توسعه داده شده برای ناحیه‌بندی شعله، تغییرات طول شعله اندازه‌گیری و مقایسه شده است. این روش امکان بررسی تأثیر تغییرات دبی جرمی و نسبت هم‌ارزی بر طول شعله را فراهم می‌کند و نتایج بهینه‌تری در طراحی و عملکرد آتش‌زنه به دست می‌آید. به منظور اطمینان از تکرارپذیری نتایج، هر نقطه کاری ۴ بار آزمایش شده است.

بررسی اثر دبی جرمی کل

¹ Partial Premixed Flame

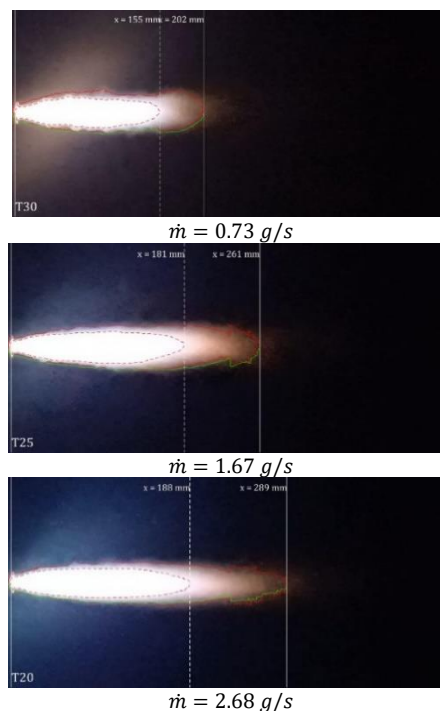
در دسته نخست آزمایش‌ها، اثر دبی جرمی کل افزایش یافته و نسبت هم‌ارزی در حدود عدد ۱، ثابت نگه‌داشته شده است. این رویکرد به بررسی تأثیر تغییرات دبی بر طول شعله و ویژگی‌های احتراق در شرایط ثابت نسبت هم‌ارزی کمک می‌کند. مشخصات دبی و فشار در این سری از آزمایش‌ها در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱- مشخصات دبی و فشار خطوط سوخت و اکسیدکننده برای حالت بررسی اثر دبی جرمی کل

Table 1- Specifications of fuel and oxidizer flow rates and pressures for the case studying the effect of total mass flow rate.

Test No.	ϕ	\dot{m}_t [g/s]	\dot{m}_{Fu} [g/s]	\dot{m}_{Ox} [g/s]	P_{Fu} [bar]	P_{Ox} [bar]
T 14	1.02	3.26	0.66	2.59	7.6	13.1
T 20	0.91	2.68	0.5	2.18	5.7	11
T 25	0.97	1.67	0.33	1.35	3.75	6.8
T 30	0.91	0.73	0.14	0.59	1.55	3
T 41	1.01	2.83	0.57	2.26	6.55	11.4

شکل ۵ تصویر شعله در نقاط تست جدول ۱ را نشان می‌دهد. با استفاده از الگوریتم توسعه داده شده، ناحیه شعله مشخص شده است. مشاهده می‌شود که در همه تصاویر، شعله به صورت آشفته بوده و دوناحیه شعله وجود دارد. ناحیه درونی که طیف رنگی آن به صورت اشباع ثبت شده است. این ناحیه در شکل‌های زیر به صورت خط چین نشان داده شده است. وجود ناحیه اشباع در مشعل‌هایی با سوخت‌های هیدروکربنی متداول است. این ناحیه به دلیل وجود دمای بالا و در حضور رادیکال CH ایجاد می‌شود. یکی از رادیکال‌های میانی مهم در فرآیند واکنش شیمیایی است که در نهایت با تبدیل شدن به گونه‌های پایدار، گرمای قابل توجهی را آزاد می‌کند. بر همین اساس، می‌توان گفت که در تصاویر ثبت شده، در واقع محدود مشخص شده با خط چین، محل اصلی واکنش‌های شیمیایی است. این اطلاعات می‌تواند به درک بهتر فرآیند احتراق و بهینه‌سازی عملکرد مشعل‌ها کمک کند.



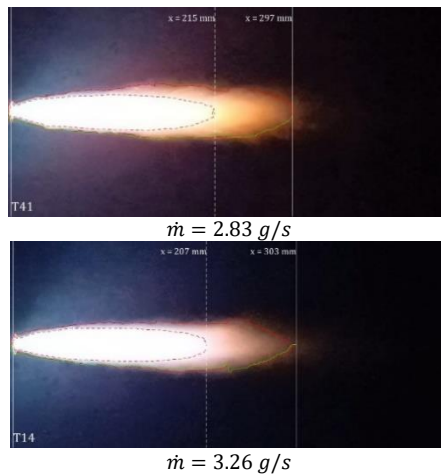


Figure 5- Processed flame images of the flame at an equivalence ratio of 1 and varying total mass flow rates.

شکل ۵- تصاویر پردازش شده شعله در نسبت هم ارزی ۱ و تغییر دبی جرمی کل

نمودار طول شعله بر اساس دبی جرمی کل، در شکل ۶ رسم شده است. همان طور که مشخص است، با تغییر دبی از ۰/۷ به ۳/۲ گرم بر ثانیه، طول شعله از حدود ۲۰۰ به ۳۰۵ میلی متر افزایش یافته است. برازش نتایج تجربی با استفاده از تابع لگاریتمی انجام شده و میزان خطا برابر با $R^2 = 0.998$ است. تغییر لگاریتمی طول شعله با دبی جرمی کل، با نتایج تجربی به دست آمده توسط مراجع [۱۱، ۱۴] نیز تطابق دارد. برای شعله آشفته‌ی پیش مخلوط، وابستگی طول شعله و دبی به جز نواحی گذار رژیم جریان (از جریان آرام به آشفته) به صورت لگاریتمی است. این نتایج نشان‌دهنده‌ی رفتار مشابه در سیستم‌های مختلف و تأثیر دبی بر طول شعله در شرایط مشابه است.

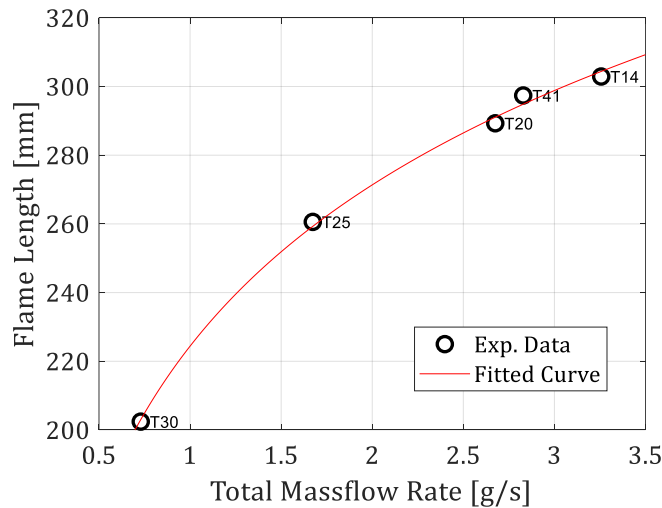


Figure 6- Variation of flame length with total mass flow rate at $\phi = 1$

شکل ۶- بررسی اثر تغییر دبی جرمی کل بر تغییرات طول شعله با دبی جرمی کل در نسبت هم ارزی ۱

طول ناحیه اشباع نیز همانند طول شعله افزایش پیدا می‌کند و روند تغییر آن در شکل ۷ ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، طول شعله در طی فرآیند افزایش دبی در نسبت هم ارزی ثابت، بیش از ۵۰ درصد افزایش می‌یابد، در حالی که طول ناحیه اشباع ۳۳ درصد افزایش می‌یابد.

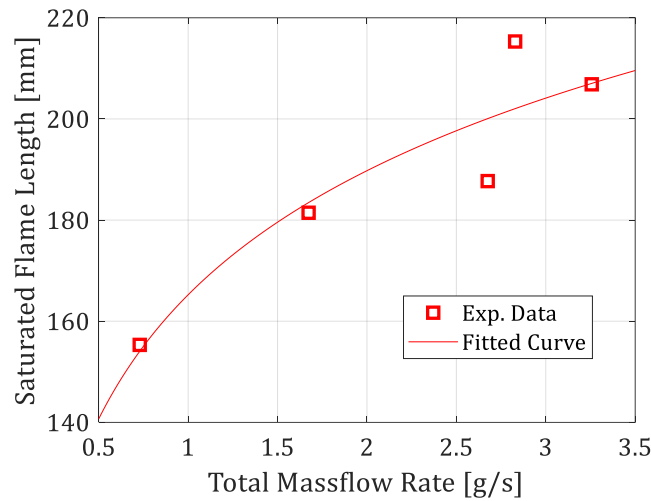


Figure 7- Variation of the saturation-region length with total mass flow rate at equivalence ratio of 1.

شکل ۷- بررسی اثر تغییر دبی جرمی کل بر تغییرات طول ناحیه اشباع با دبی جرمی کل در نسبت هم ارزی ۱

بررسی اثر نسبت هم ارزی

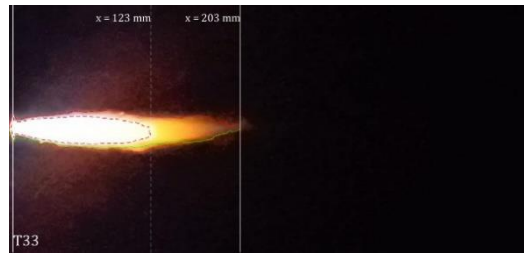
در ادامه آزمایش‌ها، اثر نسبت هم ارزی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نسبت هم‌ارزی از مقدار ۰/۳ تا ۳/۶۳ افزایش یافته و دبی جرمی کل در مقدار ثابت ۲ گرم بر ثانیه ثبت نگه‌داشته شده است. این رویکرد به بررسی تأثیر تغییرات نسبت هم‌ارزی بر طول شعله و ویژگی‌های احتراق در شرایط ثابت دبی کمک می‌کند. مشخصات نسبت هم‌ارزی و دبی در این سری از آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات دبی و فشار خطوط سوخت و اکسیدکننده برای حالت بررسی اثر نسبت هم ارزی

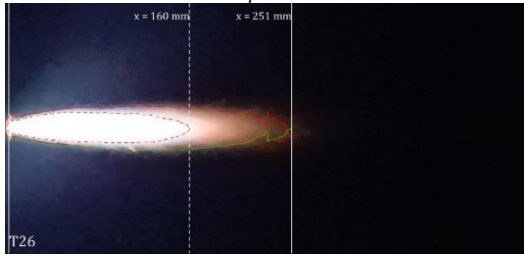
Table 2- Specifications of fuel and oxidizer flow rates and pressures for the equivalence-ratio study.

Test No.	ϕ	\dot{m}_t [g/s]	\dot{m}_{Fu} [g/s]	\dot{m}_{Ox} [g/s]	P_{Fu} [bar]	P_{Ox} [bar]
T 3	3.63	1.78	0.85	0.93	9.7	4.7
T 4	2.47	2.21	0.85	1.37	9.7	6.9
T 11	1.89	2.04	0.66	1.39	7.5	7
T 18	1.48	1.84	0.5	1.35	5.7	6.8
T 26	0.75	2.07	0.33	1.74	3.75	8.8
T 33	0.3	1.94	0.14	1.8	1.55	9.1
T 38	2.16	1.83	0.64	1.19	7.35	6
T 39	1.6	2.16	0.62	1.54	7.1	7.8

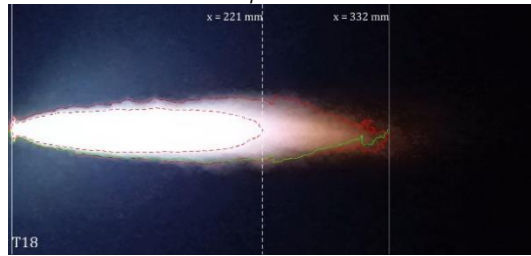
در شکل ۸، تصاویر شعله آزمایش‌های مختلف جدول ۲ ارائه شده است. این تصاویر به خوبی تغییرات ظاهری شعله را در پاسخ به تغییرات نسبت هم‌ارزی نمایان می‌سازند. در این سری از آزمایش نیز، همه شعله‌ها به صورت آشفته بوده و نیز دارای دو ناحیه درونی و بیرونی هستند.



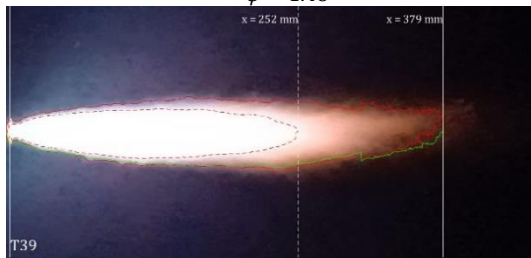
$\varphi = 0.3$



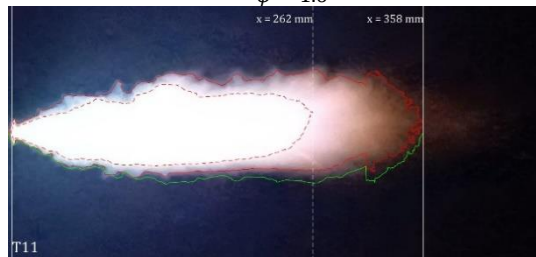
$\varphi = 0.75$



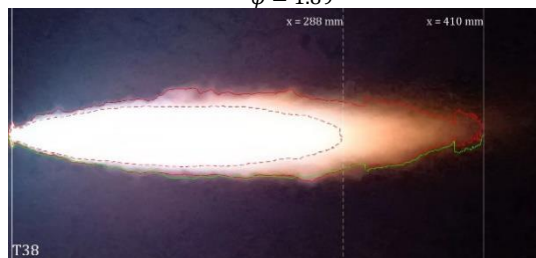
$\varphi = 1.48$



$\varphi = 1.6$



$\varphi = 1.89$



$\varphi = 2.16$

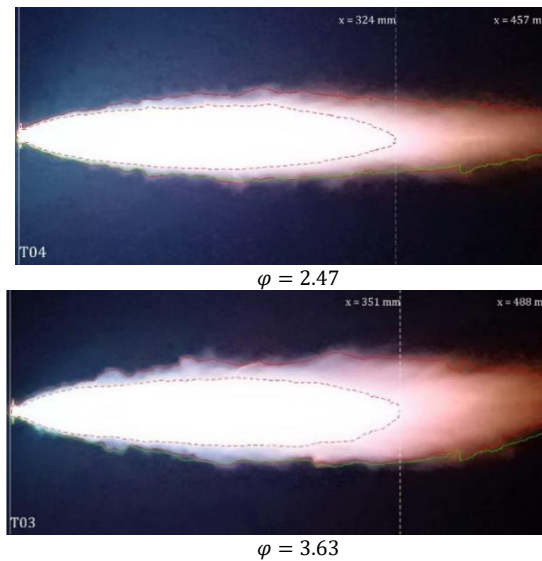


Figure 8- Processed flame images at a total mass flow rate of 2 g/s with varying equivalence ratios.

شکل ۸- تصاویر پردازش شده شعله در دبی جرمی کل ۲ گرم بر ثانیه و نسبت هم‌ارزی‌های مختلف

تغییرات طول شعله با نسبت هم‌ارزی در دبی جرمی کل ۲ گرم بر ثانیه در شکل ۹ رسم شده است. همان‌طور که از نمودار شکل ۸ مشخص است، مقدار طول شعله ۱۳۰ درصد افزایش یافته است. در شکل ۸، برازش نتایج تجربی با استفاده از تابع چندجمله‌ای درجه ۳ انجام شده و میزان خطا برابر با $R^2 = 0.975$ است.

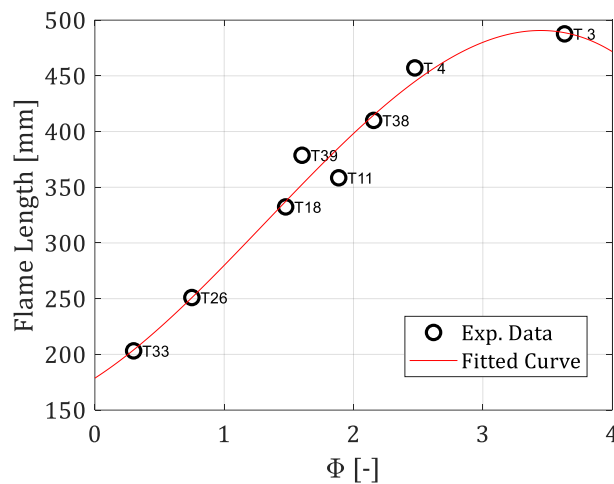


Figure 9- Variation of flame length with equivalence ratio at total mass flow rate of 2 g/s.

شکل ۹- بررسی اثر نسبت هم‌ارزی بر تغییرات طول شعله با نسبت هم‌ارزی در دبی جرمی کل ۲ گرم بر ثانیه

مشاهده می‌شود که بدون توجه به مقدار نسبت هم‌ارزی برابر با ۱ (که به‌عنوان شرایط ایده‌آل واکنش شیمیایی در نظر گرفته می‌شود)، طول شعله به‌طور مداوم با افزایش نسبت هم‌ارزی افزایش می‌یابد. این رفتار با نتایج مرجع [۱۷] هم‌راستا است که نشان می‌دهد در شعله‌های متان، کاهش درصد اکسیدکننده باعث افزایش طول شعله می‌شود. در مرجع مذکور، این افزایش طول شعله نسبت به درصد اکسیدکننده به صورت لگاریتمی گزارش شده است، حال آنکه در داده‌های حاضر، هم‌بستگی

چندجمله‌ای برای تغییرات طول شعله مشاهده شده است. در شکل ۱۰ نیز مشاهده می‌شود که طول ناحیه اشباع نیز با افزایش نسبت هم‌ارزی افزایش می‌یابد. به طوری که طول شعله و طول ناحیه اشباع به ترتیب تا حدود ۱۵۰٪ و ۲۵۰٪ افزایش نشان می‌دهند. نسبت طول ناحیه اشباع به طول کلی شعله در تمام آزمایش‌ها در محدوده ۰/۷ باقی می‌ماند که نشان‌دهنده ارتباط ساختاری قوی بین این دو ناحیه است. تصاویر شعله‌های مختلف نشان می‌دهند که ناحیه اشباع از دهانه آتش‌زنه آغاز می‌شود که نشان‌دهنده وقوع واکنش‌های احتراقی اصلی در این ناحیه است و ساختار شعله بزرگ‌تر در واقع نتیجه انبساط حرارتی و گسترش محصولات احتراق داغ به محیط پیرامون است. در شکل ۱۰، برازش نتایج تجربی با استفاده از تابع چندجمله‌ای درجه ۳ انجام شده و میزان خطا برابر با $R^2 = 0.993$ است.

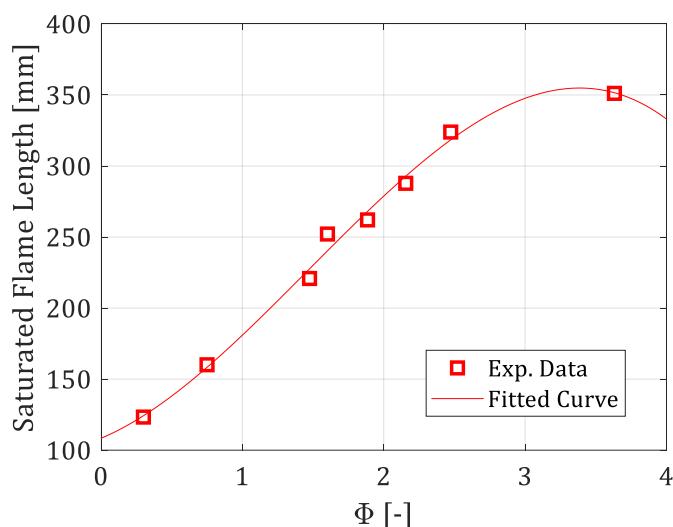


Figure 10- Variation of the saturation-region length with equivalence ratio at a total mass flow rate of 2 g/s.

شکل ۱۰- بررسی اثر نسبت هم‌ارزی بر تغییرات طول ناحیه اشباع با نسبت هم‌ارزی در دبی جرمی کل ۲ گرم بر ثانیه

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی تأثیر دبی جرمی و نسبت هم‌ارزی بر طول شعله آتش‌زنه تورچ با سوخت متان و اکسیژن گازی پرداخته شد. نتایج نشان دادند که با افزایش دبی جرمی در نسبت هم‌ارزی ثابت، طول شعله به طور قابل توجهی افزایش یافت. همچنین، افزایش نسبت هم‌ارزی در دبی جرمی ثابت، طول شعله و طول ناحیه اشباع را به ترتیب تا ۱۳۰ و ۲۵۰ درصد افزایش داد. نسبت طول ناحیه اشباع به طول کل شعله تقریباً ثابت و حدود ۰/۷ باقی ماند که نقش کلیدی این ناحیه را در فرآیند احتراق و تولید رادیکال‌های میانی مؤثر در واکنش‌های شیمیایی نشان می‌دهد. یافته‌ها همچنین همبستگی لگاریتمی بین طول شعله و تغییرات دبی و همبستگی چندجمله‌ای بین نسبت هم‌ارزی و طول شعله را تأیید کردند. همچنین، حساسیت طول شعله به تغییرات نسبت هم‌ارزی بیشتر از تغییرات دبی جرمی بود که اهمیت کنترل دقیق نسبت هم‌ارزی را در بهینه‌سازی عملکرد آتش‌زنه‌های تورچ برجسته می‌سازد. هرچند این پژوهش با محدودیت‌هایی همچون عدم آنالیز گازهای خروجی و عدم بهره‌گیری از روش‌های طیف‌سنجی همراه بود، اما تکرارپذیری بالا و خطای اندک روش اندازه‌گیری بیانگر آن است که بستر آزمون توسعه‌یافته می‌تواند پایه‌ای مناسب برای گسترش تحقیقات در شرایط عملیاتی مختلف، از جمله فشارهای پایین، سوخت‌های جایگزین، و ترکیب با شبیه‌سازی عددی، فراهم آورد.

مراجع

- [1] Y. Wang, J. Yang, G. Cai, Z. Wang, J. Fang, and L. Liu, "Effects of injection distance and droplet size on an LH₂/LOX torch igniter," *Aerospace Science and Technology*, vol. 121, p. 107334, 2022. [Online]. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107334>.
- [2] M. Pizzarelli and F. Battista, "Oxygen-methane rocket thrust chambers: Review of heat transfer experimental studies," *Acta Astronautica*, vol. 209, pp. 48–66, 2023. [Online]. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.04.029>.
- [3] S. Zhu, Y. Huang, L. Li, X. Wei, and B. Liu, "Research on laser induced plasma ignition of gas oxygen/methane," *Acta Astronautica*, vol. 217, pp. 208–220, 2024. [Online]. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.01.015>.
- [4] M. Niwa, A. Santana Jr., and K. Kessaev, "Torch with oxidizer augmentation for LOx/LH₂ engine ignition," in *Proc. 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. and Exhibit*, Jul. 2000. [Online]. <https://doi.org/10.2514/6.2000-3169>.
- [5] L. E. Sanchez, R. J. Ellis, V. Dorado, and A. R. Choudhuri, "An experimental investigation of a LOX/CH₄ torch ignition system for propulsion research," in *Proc. 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf.*, Cleveland, OH, USA, 2014. [Online]. <https://doi.org/10.2514/6.2014-3986>.
- [6] C. Pauly, J. Sender, and M. Oschwald, "Ignition of a gaseous methane/oxygen coaxial jet," *Progress in Propulsion Physics*, vol. 1, pp. 154–170, 2009.
- [7] W. M. Marshall, R. J. Osborne, and S. E. Greene, "Development of augmented spark impinging igniter system for methane engines," in *Proc. AIAA Propulsion and Energy Forum*, Atlanta, GA, USA, Jul. 10–12, 2017. [Online]. Available: NASA NTRS (Doc. ID: 20170009139). Report No. GRC-E-DAA-TN43341.
- [8] F. A. Fisher, "Some notes on sparks and ignition of fuels," NASA Langley Research Center, NASA Technical Memorandum NASA/TM-2000-210077, Mar. 2000. [Online]. Available: NASA NTRS (Doc. ID: 20000053468).
- [9] T. Yamaguchi, T. Hizawa, T. Ichikawa, T. Kudo, A. Hayakawa, and H. Kobayashi, "Total temperature estimation of a hydrogen/air burned-gas torch igniter for a scramjet combustor," *Journal of Thermal Science and Technology*, vol. 13, no. 2, pp. JTST0030–JTST0030, 2018.
- [10] X. Sun, J. Lv, Y. Han, X. Zhang, F. Tang, and L. Hu, "A global evolution of the downward jet flame behavior: From the laminar to the turbulent," *Combustion and Flame*, vol. 272, p. 113906, 2025. [Online]. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113906>.
- [11] Y. Wu, Z. Zhang, F. Liang, and N. Wang, "Combustion characterization of a CH₄/O₂ rapid mixed swirl torch igniter for hybrid rocket motors," *Aerospace Science and Technology*, vol. 98, p. 105666, 2020. [Online]. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105666>
- [12] K. K. Ochi and P. A. Erickson, "Effects of hydrogen-oxygen torch igniter combustion to an ABS-GOx hybrid rocket system," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, pp. 5668–5680, 2023. [Online]. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.145>.
- [13] K. K. Ochi, *Effects of Hydrogen-Oxygen Torch Igniter Combustion Applied to an ABS/GOx Hybrid Rocket System*. Thesis, University of California, Davis, 2022.
- [14] L. C. Öz, "Experimental and numerical investigation of an augmented spark igniter and evaluation of igniter's effective flame length as a performance parameter," MSc thesis, Middle East Technical University, Turkey, 2019.
- [15] R. F. Kulakhmetov, J. R. Gabl, and T. L. Pourpoint, "Design, analysis and testing of a low-cost hydrogen/oxygen augmented spark igniter for kerosene ignition," in *AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum*, 2020, p. 3832.
- [16] R. D. Hicks and E. C. Unruh, "Reduced pressure environment testing of an augmented spark igniter," Honors capstone thesis, Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, College of Engineering, University of Alabama in Huntsville, Huntsville, AL, USA, May 5, 2017. [Online]. <https://louis.uah.edu/honors-capstones/386>.
- [17] S. R. Turns, *Introduction to Combustion*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1996.

English Abstract

Experimental Investigation of Methane-Oxygen Torch Igniter: Effects of Mass Flow Rate and Equivalence Ratio on Flame Length

Masoud EidiAttarZade^{1*}, Mohammad Fahim²

1- Department of Aerospace Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, eidiattar@ut.ac.ir

2- Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, m.fahim1372@gmail.com

*Corresponding author

(Received: 2025/05/24, Received in revised form: 2025/08/31, Accepted: 2025/09/29)

This paper investigates how the total mass flow rate and equivalence ratio affect flame length and combustion characteristics in a methane–oxygen torch igniter. By developing an image-processing algorithm, the flame region and the light-saturation zone are identified, and their lengths are measured. Experiments are performed under two scenarios: (i) fixed equivalence ratio with varying mass flow rate, and (ii) fixed mass flow rate with varying equivalence ratio. Results show that, at a constant equivalence ratio, increasing the mass flow rate leads to a logarithmic increase in both flame length and saturation-zone length. Furthermore, at a fixed mass flow rate, increasing the equivalence ratio increases flame length and saturation-zone length by up to 130% and 250%, respectively. The ratio of saturation-zone length to total flame length remains nearly constant ~ 0.7 , highlighting the important role of this region in combustion and active-radical production. Overall, flame length is more sensitive to the equivalence ratio than to the mass flow rate. These findings can inform torch-igniter design optimization and improve the performance of methane-fueled combustion systems.

Keywords: Igniter, Torch, Enhanced Spark, Flame Length, Methane-Oxygen.