



## مطالعه تجربی تأثیر هندسه سرمشعل بر طول شعله و آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن و کربن مونواکسید در یک مشعل غیر پیش‌آمیخته

سید عبدالمهدی هاشمی\*، حامد فروزنده جونقانی، مهدی ملامهدی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

<b>چکیده:</b> در مطالعه حاضر تأثیر ابعاد مختلف سرمشعل‌های استوانه‌ای بر طول شعله و آلاینده‌های ناکس و کربن مونواکسید در یک مشعل غیرپیش‌آمیخته به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام آزمایش‌ها از یک نمونه مشعل غیرپیش‌آمیخته با سوخت گاز طبیعی و سرمشعل‌های استوانه‌ای شکل با قطرهای خارجی ثابت، قطرهای داخلی و طول‌های متفاوت استفاده شده است. در این بررسی، دو دسته مختلف از سرمشعل‌ها به کار گرفته شده است. دسته اول سرمشعل‌ها، دارای قطر داخلی ۴ و ۶ سانتیمتر با طول یکسان ۱۰ سانتیمتر و دسته دوم سرمشعل‌ها، دارای طول ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر با قطر داخلی یکسان ۶ سانتیمتر می‌باشند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که در یک توان ثابت با افزایش سرعت هوای ورودی، مقدار طول شعله کاهش و در یک سرعت هوای ثابت با افزایش توان مشعل، طول شعله افزایش می‌یابد. همچنین با بررسی اثر تغییر طول و قطر داخلی سرمشعل‌ها بر طول شعله مشاهده گردید که در یک توان ثابت مشعل، تغییر طول و قطر داخلی سرمشعل، تأثیر چندانی روی طول شعله ندارد، درحالی‌که افزایش قطر موجب کاهش حداکثر ۴۲ درصدی ناکس و افزایش ۴۰ درصدی آلاینده کربن مونواکسید می‌شود.	<b>تاریخچه داوری:</b> دریافت: بازنگری: پذیرش: ارائه آنلاین:
	<b>کلمات کلیدی:</b> مشعل غیرپیش‌آمیخته سرمشعل اکسیدهای نیتروژن کربن مونواکسید طول شعله

### ۱- مقدمه

مشاهده نمودند که شکل ناحیه گردابی در حالت استفاده از مشعل مستطیلی کشیده‌تر می‌شود. ویترفلد [۳] در مورد فرآیندهای انتقال آشفستگی در پشت سرمشعل مطالعه‌ای تجربی را انجام داد. او مشاهده نمود که سرمشعل‌هایی که جریان را به میزان بیشتری منحرف می‌کنند، تبادل آشفستگی بیشتری را به وجود می‌آورند که این نتایج با کار تجربی انجام شده توسط مستر [۴] همخوانی دارد. او همچنین گزارش نمود که سرمشعل‌ها موجب افزایش نسبت هم‌ارزی مربوط به محدوده خاموشی شده و پایداری شعله را افزایش می‌دهند. سونکو [۵] به صورت تجربی، اثر شکل یک سرمشعل اصلاح شده را بر ناحیه پایداری یک شعله نفوذی بررسی کرد. استفاده از سرمشعل موجب ایجاد گردابه و آشفستگی جریان می‌شود که با تغییر مکان محدوده بحرانی پایداری موجب ایجاد احتراق کامل در مشعل بررسی شده می‌شود. او ضمن گزارش افزایش پایداری در صورت استفاده از سرمشعل، نشان داد که سرمشعل‌هایی شبیه به یک شفت توخالی، بیشترین محدوده پایداری را نسبت به سایر سرمشعل‌ها ایجاد می‌کند. هاشمی و همکاران [۶] به مطالعه عددی بررسی تأثیر هندسه سرمشعل بر جریان احتراقی غیر پیش‌آمیخته مغشوش پرداختند. نتایج آن‌ها بیانگر آن است که تغییر در ابعاد سرمشعل بر الگوی ناحیه چرخشی و به دنبال آن جریان احتراقی اثرگذار است. همچنین آن‌ها نشان دادند که استفاده از سوخت‌های متفاوت و مقادیر مختلف شدت آشفستگی ورودی، در هندسه‌های مختلف سرمشعل، اثرات متفاوتی بر

با توجه به این که همچنان احتراق رایج‌ترین روش تولید انرژی در بسیاری موارد مانند صنایع پتروشیمی، صنایع غذایی، فولاد و کاربردهای تهویه مطبوع می‌باشد، لذا تلاش‌های بسیاری در جهت بهبود عملکرد تجهیزات احتراقی صورت گرفته است. یکی از این موارد، تلاش در جهت بهبود پایداری شعله می‌باشد. یکی از روش‌های متداول در ایجاد پایداری، استفاده از سرمشعل‌ها است. تاکنون مطالعات زیادی در مورد اثر به کارگیری سرمشعل‌ها در احتراق انجام شده است که تعدادی از آن‌ها در ادامه ذکر شده است. چن و همکاران [۱] دو روش مختلف استفاده از جسم مانع و چرخشی کردن احتراق را به منظور پایداری شعله با استفاده از روش آزمایشگاهی در یک مشعل غیر پیش‌آمیخته بررسی نمودند. آن‌ها در بررسی خود پارامترهای قدرت گردابه و شار مومنتوم جت هوا و سوخت را در نظر گرفتند. نتایج گزارش شده توسط آن‌ها نشان می‌دهد که در حالت چرخشی کردن جریان بایستی عدد چرخش برابر ۰/۵ باشد تا قدرت گردابه‌ای مشابه حالت استفاده از مانع ایجاد گردد. هاساکاوا و همکاران [۲] تأثیر شکل سرمشعل را بر ناحیه گردابی با استفاده از روش عددی و مدل آشفستگی k-ε مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از محفظه مستطیلی سرمشعل موجب افزایش پایداری شعله در پشت سرمشعل می‌شود. همچنین آن‌ها

می‌دهد. اربیت و همکاران [۱۲] در یک مشعل غیر پیش‌آمیخته به صورت تجربی، تأثیر رقیق‌سازی با کربن دی‌اکسید را بر ساختار و میزان آلاینده‌گی شعله‌های آشفته حاصل از مخلوط متان-هوا را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش رقیق‌سازی، ارتفاع برخاستگی، طول شعله، دمای شعله و غلظت آلاینده ناکس کاهش می‌یابد. بوشاکی و همکاران [۱۳] انتشار آلاینده‌ها و دینامیک شعله‌های غیر پیش‌آمیخته ناشی از مخلوط غنی اکسیژن و متان را در یک مشعل چرخشی به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که افزایش غلظت اکسیژن به میزان ۹٪ به همراه افزایش عدد چرخشی از ۰/۸ به ۱ و افزایش نسبت هم‌ارزی از ۰/۸ به ۱، باعث کاهش آلاینده ناکس می‌شود. کوبایاشی و همکاران [۱۴] اثر آشفته‌گی بر ساختار شعله و میزان انتشار آلاینده ناکس شعله‌های یک مشعل غیر پیش‌آمیخته با هوای احتراق دما بالا را به صورت تجربی بررسی نمودند. آن‌ها با توجه به نتایج خود، نشان دادند که در سرمشعل‌های متفاوت با افزایش میزان آشفته‌گی جریان، آلاینده ناکس کاهش می‌یابد. تراساکی و هایاشی [۱۵] تأثیر مخلوط سوخت و هوا را بر تشکیل ناکس در مشعل‌های چرخشی غیر پیش‌آمیخته بررسی کردند. نتایج تجربی آن‌ها نشان می‌دهد که میزان ناکس بیشتری در سرمشعل با تویی بزرگتر نسبت به سایر سرمشعل‌های مورد بررسی ایجاد می‌شود. همچنین آن‌ها مشاهده نمودند که آلاینده ناکس به سرعت در ناحیه بالادست لوله شعله تشکیل می‌شود. کیم و همکاران [۱۶] به روش تجربی، تأثیر تشعشع شعله را بر مقیاس انتشار نیتروژن در شعله غیر پیش‌آمیخته جریان هیدروژن آشفته بررسی نمودند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که میزان انتشار ناکس با توان ۰/۶۶ کسر تشعشعی در محدوده‌ای که اثر مومنتوم شعله‌های آشفته جت هیدروژن غالب است، متناسب است. ملو و همکاران [۱۷] در مطالعه‌ای تجربی به بررسی تأثیر نسبت هم‌ارزی و عدد رینولدز بر انتشار آلاینده ناکس در شعله‌های آشفته غیر پیش‌آمیخته پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که به ازای هر نسبت هم‌ارزی و هر موقعیت طولی، میزان ناکس با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که در نسبت هم‌ارزی ۱/۳ میزان ناکس بیشتر از حالتی است که نسبت هم‌ارزی برابر مقدار استوکیومتری است. در مطالعه‌ای تجربی اوه و همکاران [۱۸] با بررسی اثر تحریک صوتی بر شعله آشفته غیر پیش‌آمیخته جت هیدروژن با جریان محوری هوا، گزارش نمودند که طول شعله و میزان ناکس با تحریک صوتی کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین کمترین میزان ناکس را در فرکانس تشدید مشاهده نمودند. در بررسی دیگری بازبار و همکاران [۱۹] اثر چرخش را بر تشکیل آلاینده ناکس در شعله غیر پیش‌آمیخته پروپان-هوا به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. آن‌ها برای مدلسازی آشفته‌گی جریان از مدل  $k-\epsilon$  استفاده نمودند و نشان دادند که با افزایش عدد چرخش، دما و میزان ناکس حرارتی در ابتدا به آرامی افزایش یافته و سپس به شدت کاهش می‌یابد.

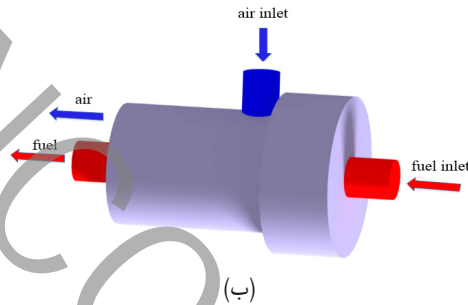
با توجه به بررسی انجام شده، در اغلب مطالعات پیشین توجهی به استفاده از سرمشعل‌ها در کاهش آلاینده‌های احتراق غیر پیش‌آمیخته به

پارامترهای احتراقی دارد. در بررسی دیگری هاشمی و همکاران [۷] تأثیر شدت آشفته‌گی ورودی بر ساختار شعله با استفاده از سرمشعل‌های متفاوت را به روش عددی بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش شدت آشفته‌گی ورودی هوا، طول شعله، دمای شعله، میزان ناکس و اختلاف دما در ناحیه شعله به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها گزارش نمودند که با افزایش شعاع سرمشعل، طول شعله و دمای بیشینه آن کاهش و با افزایش طول سرمشعل، طول شعله کاهش و دمای بیشینه آن افزایش می‌یابد. در بررسی دیگری، میگوئل و همکاران [۸] به روش تجربی و عددی تأثیر دمای سرمشعل بر پایداری شعله آرام متان-هوا در یک استوانه را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مطالعه خود را برای حالتی که استوانه با آب خنک می‌شود و دمای آن به  $300\text{K}$  می‌رسد و برای حالتی که عملیات خنک‌کاری در آن صورت نمی‌گیرد و دمای آن به  $700\text{K}$  می‌رسد، انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که پایداری شعله برای حالتی که عملیات خنک‌کاری صورت نمی‌گیرد، نزدیک‌تر به استوانه می‌باشد. در مطالعه‌ای تجربی، هانگ و همکاران [۹] اثر مشخصه‌های حرارتی سرمشعل را بر ناپایداری احتراق بررسی کردند. استفاده از سرمشعل‌های سرامیکی موجب تأخیر در شکل‌گیری ناپایداری در شرایط کاری معینی می‌شود، اما استفاده از موادی با ضریب هدایتی بالا برای سرمشعل موجب می‌شود که ناپایداری در محدوده وسیعی از شرایط عملکردی ایجاد شود. در بررسی دیگری هاشمی و جونتانی [۱۰] تأثیر استفاده از سرمشعل‌ها با طول‌ها و قطرهای متفاوت سرمشعل را بر پایداری یک شعله غیر پیش‌آمیخته به صورت تجربی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش طول سرمشعل، منطقه بیشینه دما به سمت داخل سرمشعل حرکت کرده و پایداری را افزایش می‌دهد. همچنین آن‌ها گزارش نمودند که با افزایش قطر سرمشعل منطقه بیشینه دما به سمت خارج سرمشعل حرکت کرده و پایداری را کاهش می‌دهد. معمولاً طراحی مشعل‌ها بر اساس احتراق پیش‌آمیخته و غیر پیش‌آمیخته می‌باشد. مشعل‌های پیش‌آمیخته به دلیل محدودیت‌هایی مانند کمبود طول اختلاطی و خوداشتعالی، کمتر در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند و بیشتر مشعل‌های غیر پیش‌آمیخته استفاده می‌شوند. با این حال، در این نوع مشعل‌ها نیز بحث آلاینده‌گی محصولات احتراق باعث ایجاد محدودیت‌هایی در به‌کارگیری آن‌ها می‌شود، لذا محققان راهکارهایی را برای کاهش آلاینده‌گی این نوع مشعل‌ها ارائه داده‌اند.

محمودی و همکاران [۱۱] به مطالعه تجربی مشعل غیرپیش‌آمیخته پروپان-هوا در محفظه احتراق پرداختند. آن‌ها اثر رقیق‌سازی سوخت با رقیق‌کننده کربن دی‌اکسید را بر تشکیل آلاینده‌ها در این نوع مشعل مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی این تحقیق نشان داد که با رقیق‌سازی سوخت، دمای محفظه احتراق به دلیل افزایش ظرفیت حرارتی مخلوط و کاهش غلظت اکسیژن کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها نشان دادند که در محدوده نسبت‌های هم‌ارزی  $1/3 - 0/7$ ، رقیق‌سازی با دی‌اکسید کربن به طور متوسط تقریباً ۷۰٪ ناکس را نسبت به حالت بدون رقیق‌سازی کاهش



(الف)



(ب)

Fig. 1. a) A real view of non-premixed burner with base, b) Schematic view of non-premixed burner

شکل ۱: الف) نمونه واقعی مشعل غیر پیش آمیخته به همراه پایه نگهدارنده  
ب) شکل شمایی مشعل غیر پیش آمیخته



(الف)



(ب)

Fig. 2. a) The Flame holder samples, b) Position of flame holder on base  
شکل ۲: الف) نمونه‌های مختلف سرمشعل‌ها ب) نحوه قرارگیری سرمشعل روی پایه نگهدارنده

همچنین در شکل ۳ طرح‌واره کلی سیستم در نظر گرفته شده برای این بررسی تجربی نشان داده شده است. ترموکوپل‌ها برای اندازه‌گیری دما بیرون سرمشعل قرار داده شده‌اند. مقادیر اندازه‌گیری شده توسط آن‌ها پس از عبور از یک تبدیل‌کننده، از طریق یک کابل برای ذخیره‌سازی اطلاعات به یک دستگاه رایانه متصل می‌شوند. لازم به ذکر است که به منظور اندازه‌گیری غلظت و دمای گازهای خروجی دودکش از دستگاه testo ۳۵۰ M/XL

صورت تجربی نشده است و بیشتر در مورد اثر استفاده از سرمشعل‌ها در پایداری شعله‌ها پرداخته شده است. به همین دلیل در این تحقیق تأثیر سرمشعل‌های استوانه‌ای مختلف روی تولید آلاینده‌ها و طول شعله در یک مشعل غیر پیش آمیخته به صورت تجربی مورد توجه قرار گرفته است.

## ۲- شرح دستگاه آزمایش

به منظور انجام آزمایش‌های موردنظر یک مشعل غیر پیش آمیخته مانند شکل ۱ طراحی و ساخته شده است که در آن، سوخت و هوا از دو مسیر جداگانه وارد می‌شوند. در شکل ۱-الف نمونه واقعی این مشعل و در شکل ۱-ب شماتیک آن نشان داده شده است. سوخت مورد استفاده در این تحقیق گاز طبیعی است. بر اساس اطلاعات دریافت شده از شرکت گاز منطقه، ارزش حرارتی گاز طبیعی  $8400 \text{ kcal/m}^3$  و چگالی آن  $0.744 \text{ kg/m}^3$  است. به منظور تأمین هوای موردنیاز برای احتراق از یک کمپرسور ۲۰۰ لیتری با قابلیت فشرده کردن هوا تا  $10 \text{ bar}$  استفاده شده است. همچنین برای تثبیت فشار هوا از یک تنظیم‌کننده فشار و برای جلوگیری از ورود گردوغبار و ذرات معلق از یک فیلتر در مسیر جریان استفاده شده است. برای اندازه‌گیری دبی سوخت و هوا از روماتر استفاده شده است. روماتر در نظر گرفته شده برای اندازه‌گیری دبی هوا در این تحقیق، بازه‌ی کارکردی بین ۱ تا  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  مترمکعب با دقت اندازه‌گیری  $0.5$  متر مکعب بر ساعت دارد و با توجه به سطح مقطع ورودی هوا به محفظه احتراق، سرعت هوا محاسبه می‌شود. روماتر در نظر گرفته شده برای اندازه‌گیری دبی سوخت، حداکثر تا  $1000$  لیتر بر ساعت با دقت  $\pm 10$  لیتر بر ساعت اندازه‌گیری می‌کند. همچنین در این بررسی، سرمشعل‌های استوانه‌ای در نظر گرفته شده از جنس آلومینا می‌باشند. برای این منظور از دو سری سرمشعل استفاده شده است. سری اول سرمشعل‌ها دارای قطر داخلی ۴ و ۶ سانتیمتر و طول یکسان ۱۰ سانتیمتر و سری دیگر با طول‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر و قطر داخلی یکسان ۶ سانتیمتر می‌باشند که در شکل ۲-الف نشان داده شده‌اند. همچنین در شکل ۲-ب نحوه‌ی قرارگیری سرمشعل‌ها درون مشعل و محفظه احتراق نشان داده شده است. با توجه به دمای بالای شعله در این تحقیق از ترموکوپل نوع B استفاده شده است. مشعل به کار رفته در این آزمایش دارای ورودی‌های مجزا به شکل دو دایره هم‌مرکز برای هوا و سوخت است. ترتیب مجرای هوا و سوخت به صورت شکل شماتیک ۲-ب می‌باشد. قطرهای آن‌ها نیز به ترتیب  $33/53 \text{ mm}$  و  $15/7 \text{ mm}$  می‌باشند. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، سوخت و هوا به طور جداگانه پس از عبور از روماترهای مربوطه وارد مشعل مورد آزمایش می‌شوند. محفظه احتراق نیز دارای قطر  $20.3/2 \text{ mm}$  می‌باشد. مطالعه انجام شده توسط چنگ و همکاران [۲۰] حاکی از بی‌اثر بودن ابعاد محفظه احتراق بر ساختار شعله است. در صورتی که شعاع محفظه احتراق ۳ تا ۵ برابر بزرگتر از شعاع مشعل باشد. در این مطالعه نیز این شرط برقرار است و لذا ابعاد محفظه احتراق اثری بر ساختار شعله ندارد.

### ۳-۲- تحلیل خطا و تکرارپذیری

یکی از مباحث مهم در انجام مطالعات آزمایشگاهی، برآورد میزان خطای موجود و یا عدم قطعیت در نتایج حاصل از آزمایش‌هاست. روش‌های مختلفی برای تعیین میزان خطا وجود دارد. یک روش این است که کلیه خطاها به صورت تشدید جمع شوند تا عدم قطعیت نتیجه‌ی نهایی به دست آید. ولی احتمال این که تمام پارامترها در یک زمان بیشینه خطا را داشته باشند و علامت خطاها به شکلی باشد که همه مقادیر خطا با یکدیگر جمع شوند، بسیار کم است. یک روش دقیق‌تر برای تخمین نتایج تجربی توسط هولمن [۲۱] ارائه گردیده است که در این تحقیق از آن بهره گرفته شده است. در این روش عدم قطعیت پارامتری مانند  $R$  برحسب کمیت‌های مستقل اندازه‌گیری شده، بیان می‌شود. اگر  $W_R$  عدم قطعیت کمیت وابسته‌ی موردنظر و عدم قطعیت کمیت‌های مستقل  $X_1$  تا  $X_n$  برابر  $w_1$  تا  $w_n$  باشد، آنگاه مقدار  $W_R$  با استفاده از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$W_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \times w_1\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \times w_n\right)^2} \quad (4)$$

به طور کلی خطاهایی که در یک فرآیند آزمایشگاهی امکان ایجاد دارند، عبارتند از: خطای موجود در وسایل اندازه‌گیری، خطای اندازه‌گیری ناشی از عدم دقت پژوهشگر و خطای موجود در محاسبات. با توجه به ساده بودن معادلات به کار رفته و کم بودن حجم محاسبات، میزان خطای ناشی از گردکردن و عملیات محاسباتی بسیار اندک و قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. در این بررسی فرض شده است که عدم قطعیت مربوط به ارزش حرارتی گاز و ابعاد ناچیز است. همچنین خطای موجود در ثبت زمانی دمای ترموکوپل‌ها، در تمام اندازه‌گیری‌ها وجود دارد که در آنالیز خطای انجام شده لحاظ نشده است. با توجه به نتایج اصلی موجود در این تحقیق، پارامترهای متأثر از خطا شامل نسبت هم‌ارزی، نرخ آتش و دما می‌باشد. عدم قطعیت دما برابر مجموع دو خطای مربوط به ترموکوپل بوده که برابر  $3/6$  درجه سلسیوس می‌باشد. در شکل ۴ مقادیر عدم قطعیت نرخ آتش و نسبت هم‌ارزی اندازه‌گیری شده برای دو حالت مختلف آورده شده است. حالت اول مربوط به سرمشعل با مشخصات  $L = 20 \text{ cm}$  و  $D = 6 \text{ cm}$  و حالت دوم مربوط به  $L = 20 \text{ cm}$  و  $D = 4 \text{ cm}$  است.

همچنین برای بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها، برای هر نقطه، میانگین حسابی چهار داده آزمایشگاهی محاسبه و به عنوان داده‌ی نهایی آزمایشگاهی استفاده شده است. مقدار عدم قطعیت داده‌ها از رابطه (۵) محاسبه شده است.

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{N^{0.5}} \quad (5)$$

در رابطه بالا،  $\sigma_m$  انحراف معیار مقدار میانگین،  $\sigma$  انحراف معیار مجموعه اندازه‌گیری‌ها و  $N$  تعداد اندازه‌گیری‌ها در هر نقطه است. مقدار درصد عدم قطعیت داده‌های آزمایشگاهی ناشی از تکرار آن‌ها،  $(X)$ ، از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$\%X = \frac{\sigma_m}{x} \times 100 \quad (6)$$

استفاده شده است. محل قرارگیری واقعی سنسور دستگاه در دودکش محفظه احتراق در شکل ۲-ب و به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است. این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری غلظت ناکس تا  $3000 \text{ ppm}$  و غلظت CO تا  $10000 \text{ ppm}$  را دارد. همچنین درصد اکسیژن و کربن دی‌اکسید گازهای خروجی نیز به وسیله این دستگاه قابل اندازه‌گیری است. دقت اندازه‌گیری این دستگاه برای غلظت ناکس،  $5 \text{ ppm}$  در غلظت‌های کمتر از  $100 \text{ ppm}$  و برای غلظت CO،  $10 \text{ ppm}$  برای غلظت‌های کمتر از  $100 \text{ ppm}$  می‌باشد.

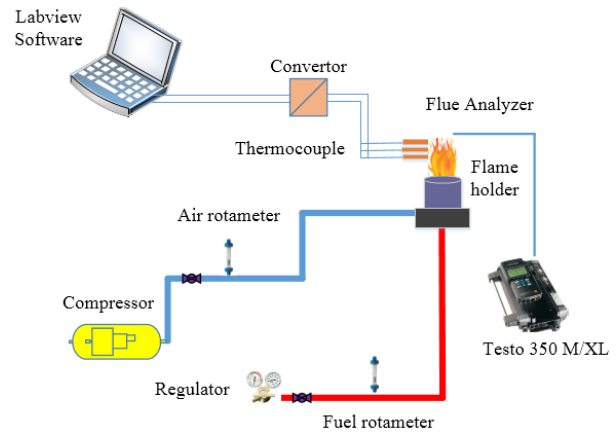


Fig. 3. Experimental equipment

شکل ۳: طرحواره کلی از مشعل و وسایل اندازه‌گیری آزمایش

### ۳-۳- روابط، تحلیل خطا و تکرارپذیری نتایج آزمایشگاهی

۳-۱- روابط مورد استفاده

در ابتدای این بخش، روابط مورد استفاده در این مطالعه ارائه می‌گردد. نسبت هم‌ارزی در احتراق سوخت، به صورت نسبت سوخت به هوا بر پایه جرمی در حالت واقعی به حالت استوکیومتری بیان شده و بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$\phi = \frac{(FA)_{act}}{(FA)_{stoic}} \quad (1)$$

نرخ آتش نیز عبارت است از حاصل ضرب ارزش حرارتی سوخت در دبی حجمی آن به واحد سطح مقطع مشعل که به صورت رابطه (۲) نوشته می‌شود.

$$FR = \frac{LHV \times Q_f}{A} \quad (2)$$

در رابطه بالا،  $LHV$  بیانگر ارزش حرارتی گاز طبیعی بر حسب کیلو ژول بر متر مکعب،  $Q_f$  دبی حجمی گاز بر حسب متر مکعب بر ثانیه و  $A$  سطح مقطع سرمشعل بر حسب متر مربع می‌باشد. رابطه مورد استفاده برای توان مشعل نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P = m_f' LHV \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $m_f'$  بیانگر دبی جرمی سوخت است.



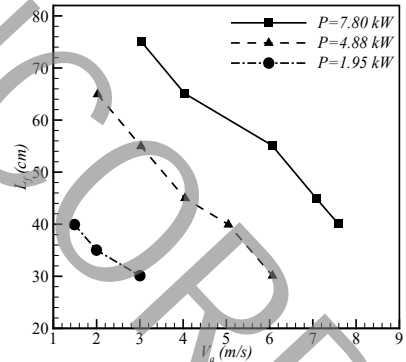
#### ۴- نتایج

در این بخش نتایج تجربی به دست آمده در دو بخش طول شعله و آلاینده‌ها به صورت نمودارها و جداولی ارائه می‌شود.

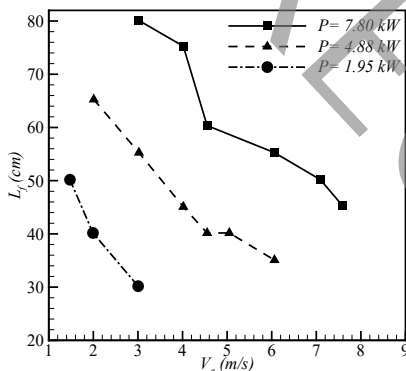
#### ۴-۱- طول شعله

#### ۴-۱-۱- اثر تغییر طول سرمشعل بر طول شعله

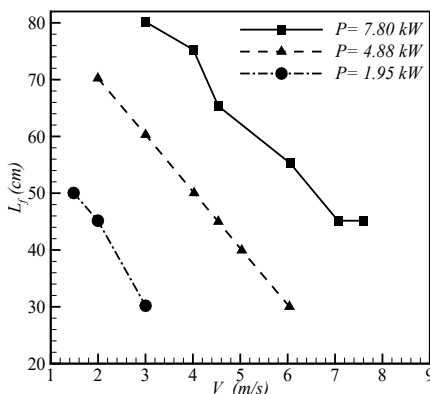
به منظور بررسی اثر تغییر طول سرمشعل بر روی طول شعله، سه سرمشعل با طول‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر مورد آزمون قرار گرفته است.



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 6. Flame length versus air velocity for flame holder with D=4 cm, and a) L=10 cm b) L=15 cm c) L=20 cm

شکل ۶: طول شعله بر حسب سرعت هوای ورودی برای سرمشعل با

$L=20$  cm (ج) و  $L=15$  cm (ب) و  $L=10$  cm (الف) و  $D=4$  cm

در رابطه بالا، مقدار  $\bar{x}$  که برابر مقدار میانگین حسابی داده‌های آزمایشگاهی است.

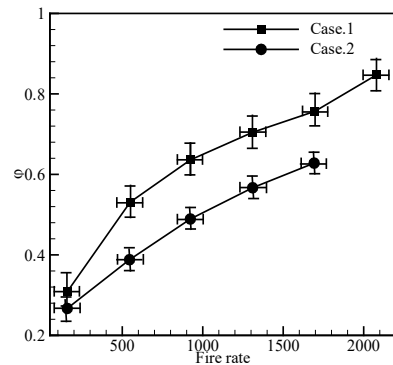


Fig. 4. Changes in the equivalence ratio with the rate of fire along with showing uncertainty on the test points

شکل ۴: تغییرات نسبت هم ارزی با نرخ آتش همراه با نشان دادن عدم قطعیت بر روی نقاط آزمایشی

در مطالعه آزمایشگاهی حاضر، طول شعله مقداری است که روی خط مرکزی از پایه شعله تا آخرین نقطه روشنایی قابل رویت است و به روش عکس برداری به دست آمده است [۱۲]. برای توصیف بیشتر نحوه به دست آوردن مقادیر طول شعله، تصاویر گرفته شده در یک دبی سوخت و هوای مشخص در شکل ۵ آورده شده است.

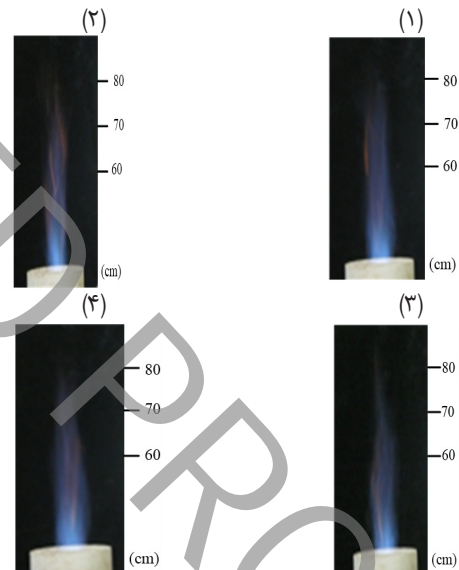


Fig. 5. Flame images for measuring of flame length

شکل ۵: چهار تصویر مختلف از یک مشعل مشخص با شعله برای اندازه‌گیری مقدار طول شعله

این تصاویر برای سرمشعل با طول ۱۰ سانتیمتر و قطر ۶ سانتیمتر می‌باشد. توان ورودی در این حالت ۷/۸ کیلووات و سرعت هوا ۷/۱ متر بر ثانیه می‌باشد. تمامی طول شعله‌ها همانند این حالت با استفاده از میانگین‌گیری از طول چهار شعله به دست آمده است.

#### ۴-۱-۲- اثر تغییر قطر سرمشعل بر طول شعله

به منظور بررسی اثر تغییر قطر سرمشعل بر روی طول شعله، دو سرمشعل با طول ۱۰ و قطرهای ۴ و ۶ سانتیمتر به‌ازای توان‌های مختلف مورد آزمون قرار گرفته است. در شکل ۸ نمودار طول شعله برحسب سرعت هوای ورودی برای سرمشعل‌های با قطر ۴ و ۶ سانتیمتر در توان ثابت ۷/۸۰ کیلووات نشان داده شده است. در این شکل، نمودارهای هر دو حالت تقریباً بر هم منطبق می‌باشند و تنها در سرعت‌های سوخت پایین کاهش قطر سرمشعل موجب افزایش ۵ درصدی طول شعله می‌شود. بنابراین همانند آنچه که در مورد تغییر طول سرمشعل ذکر گردید، می‌توان گفت که تغییر قطر سرمشعل نیز تأثیر محسوسی روی طول شعله ندارد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده در این بخش می‌توان نتیجه گرفت که در یک توان ثابت، تغییر قطر سرمشعل تأثیر چندانی روی مقدار طول شعله به خصوص در سرعت‌های هوای بیشتر از ۶m/s ندارد.

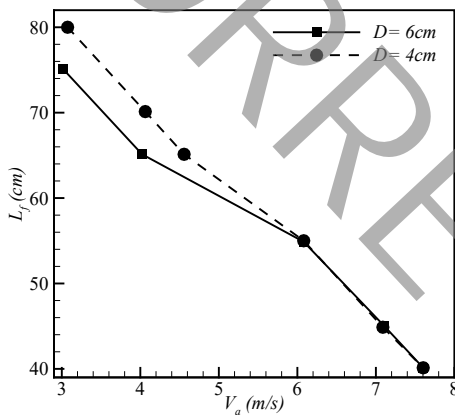


Fig. 8. Flame length versus inlet air velocity for different diameters of flame holder at  $P=7.80$  kW

#### شکل ۸: طول شعله بر حسب سرعت هوای ورودی برای سرمشعل با قطرهای مختلف در توان ۷/۸۰ کیلووات

#### ۴-۲- بررسی میزان تولید آلاینده‌های ناکس و کربن مونواکسید

در جدول ۱ مقادیر غلظت آلاینده‌های  $NO_x$  و CO برای سه سرمشعل با طول‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر برای دو نسبت هم‌ارزی متفاوت در نرخ آتش ۱۷۲۵ کیلووات بر متر مربع آورده شده است. لازم به ذکر است که انتخاب نسبت‌های هم‌ارزی مورد مطالعه به دلیل کارکرد واقعی این مشعل‌ها در محدوده رقیق بوده و برابر ۰/۶ و ۰/۹ است. همان‌گونه که در این جدول مشخص است، در نسبت هم‌ارزی ۰/۶ با افزایش طول سرمشعل غلظت آلاینده  $NO_x$  برای دو حالت سرمشعل ۱۰ و ۱۵ سانتیمتری تقریباً ثابت است، اما برای سرمشعل ۲۰ سانتیمتری به دلیل افزایش ۱۵ درصدی دمای گازهای خروجی اندکی افزایش یافته است. در مورد غلظت آلاینده CO نیز مشاهده می‌شود که ابتدا مقدار آن کاهش و سپس افزایش یافته است. بنابراین می‌توان گفت که در نسبت هم‌ارزی ۰/۶ استفاده از سرمشعل به طول ۱۵ cm موجب کاهش حداکثر ۱۱ درصدی آلاینده CO می‌شود. مقادیر دمای گازهای خروجی نیز

در این آزمون‌ها مقادیر طول شعله به روشی که در بخش قبل تشریح شد، به‌دست آمده است. محور عمودی نمودارها طول شعله بر حسب سانتیمتر و محور افقی سرعت هوا بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد. در شکل ۶-الف برای سرمشعل با طول ۱۰ و قطر ۶ سانتیمتر، شکل ۶-ب برای سرمشعل با طول ۱۵ و قطر ۶ سانتیمتر و شکل ۶-ج برای سرمشعل با طول ۲۰ و قطر ۶ سانتیمتر، مقادیر طول شعله برحسب سرعت هوای ورودی در توان‌های ۱/۹۵، ۴/۸۸ و ۷/۸۰ کیلووات ترسیم شده است.

با توجه به این شکل ۶-الف مشاهده می‌شود که برای یک توان ثابت با کاهش سرعت هوای ورودی، طول شعله افزایش می‌یابد. علت آن از این امر ناشی می‌شود که با کاهش هوای ورودی، شعله به‌منظور تأمین هوای مورد نیاز خود از هوای اطراف استفاده می‌کند و همین امر موجب می‌شود که شعله کشیده شده و طول آن افزایش پیدا کند. همچنین در شکل ۶-ب و شکل ۶-ج همانند شکل ۶-الف، مشاهده می‌شود که با کاهش سرعت هوا، طول شعله افزایش می‌یابد. لذا با توجه به شکل ۶، می‌توان گفت که رابطه بین طول شعله و سرعت هوا تقریباً خطی می‌باشد که این رابطه خطی برای سرمشعل با طول ۲۰ سانتیمتر به وضوح دیده می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهند که برای یک سرمشعل مشخص، با افزایش توان مقدار طول شعله افزایش می‌یابد، از آنجا که مقدار طول شعله با دبی سوخت و ورودی نسبت مستقیم دارد، بنابراین در یک سرعت هوای ثابت، با افزایش میزان دبی سوخت طول شعله نیز افزایش می‌یابد.

مقادیر طول شعله برحسب سرعت هوای ورودی در توان ثابت ۷/۸۰ کیلووات برای سه سرمشعل با طول‌های متفاوت در شکل ۷ رسم شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با تغییر طول سرمشعل از ۱۰ به ۲۰ سانتیمتر مقادیر طول شعله تغییر چندانی نمی‌کند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تغییر طول سرمشعل تأثیر چندانی روی طول شعله ندارد.

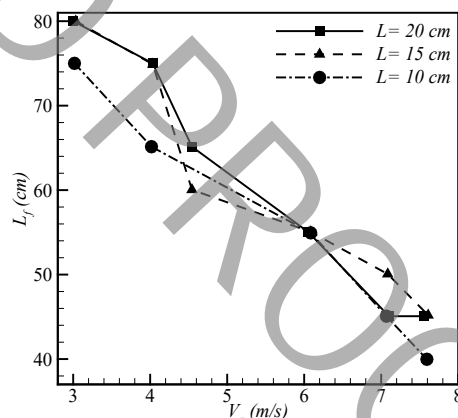


Fig. 7. Flame length versus inlet air velocity for different heights of flame holder at  $P=7.80$  kW

#### شکل ۷: طول شعله بر حسب سرعت هوای ورودی برای سرمشعل با طول‌های مختلف به‌ازای توان ۷/۸۰ کیلووات

جدول ۳ نیز به منظور مشاهده اثر نرخ آتش بر غلظت آلاینده‌های  $NO_x$  و CO و دمای گازهای خروجی برای سرمشعل با قطر ۴ سانتیمتر گزارش شده است.

**جدول ۳: غلظت  $NO_x$  و CO و دمای گازهای خروجی برای  $D=4$  cm و  $L=10$  cm در نسبت‌های هم‌ارزی و نرخ‌های آتش مختلف**

**Table 3.  $NO_x$  concentration, CO concentration, and outlet gas temperature at  $D=4$  cm and  $L=10$  cm for different equivalence ratio and fire rate**

FR (kW/m <sup>2</sup> )		نتایج
۱۷۲۵	۱۵۰۰	
$\phi=0/6$		
۱۴	۱۲	غلظت $NO_x$ (ppm)
۵۷۸	۵۷۴	غلظت CO (ppm)
۴۳۷/۸	۳۱۰/۷	$T_o$ (°C)
$\phi=0/9$		
۱۹	۱۶	غلظت $NO_x$ (ppm)
۲۴۶	۲۴۵	غلظت CO (ppm)
۴۶۹/۱	۳۵۳/۱	$T_o$ (°C)

همان‌طور که مشخص است با افزایش نرخ آتش در هر دو نسبت هم‌ارزی مورد بررسی، دمای گازهای خروجی و آلاینده  $NO_x$  افزایش یافته است که دلیل افزایش آلاینده  $NO_x$  مربوط به افزایش  $NO_x$  حرارتی است. به طوری که در نسبت هم‌ارزی ۰/۶ با افزایش حدود ۱۳ درصدی نرخ آتش، دمای گازهای خروجی حدود ۳۰ درصد و آلاینده  $NO_x$  حدود ۱۴ درصد افزایش یافته است. از آنجا که پارامتر مهم در تغییر آلاینده CO نسبت هم‌ارزی است، لذا در نسبت هم‌ارزی ثابت با تغییر نرخ آتش، تغییر چندانی در غلظت آلاینده CO مشاهده نشده است.

### ۵- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر طول شعله، تولید آلاینده ناکس و کربن مونواکسید در یک مشعل غیر پیش‌آمیخته تحت تأثیر تغییر هندسه سرمشعل مورد مطالعه قرار گرفته است. برای انجام آزمایش‌ها یک نمونه مشعل غیرپیش‌آمیخته و سرمشعل‌های استوانه‌ای شکل با ابعاد مختلف طراحی و ساخته شد. نتایج تجربی نشان می‌دهند که برای یک توان ثابت با افزایش سرعت هوای ورودی، مقدار طول شعله کاهش می‌یابد. همچنین در یک سرعت هوای ورودی مشخص با افزایش توان مشعل، طول شعله افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که تغییر طول و قطر سرمشعل در یک توان ثابت، تأثیر چندانی روی طول شعله ندارد.

نتایج مربوط به تأثیر هندسه سرمشعل بر میزان تولید آلاینده‌ها نشان می‌دهد که در نسبت‌های هم‌ارزی رقیق با افزایش طول سرمشعل، غلظت آلاینده ناکس تا طول ۱۵ cm ثابت و برای طول ۲۰ cm افزایش می‌یابد، اما غلظت کربن مونواکسید ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در مورد تأثیر قطر سرمشعل بر میزان تولید آلاینده‌ها، مشاهده می‌شود که با افزایش قطر سرمشعل، مقدار غلظت آلاینده ناکس حداکثر ۴۲ درصد کاهش و کربن

با افزایش طول سرمشعل در محدوده نسبت هم‌ارزی مورد بررسی به طور پیوسته افزایش می‌یابد. همچنین در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ وضعیت آلاینده CO در حالت استفاده از سرمشعل به طول ۱۵cm حداکثر ۳۵ درصد کاهش پیدا می‌کند. در این نسبت هم‌ارزی آلاینده  $NO_x$  رفتاری مشابه با نسبت هم‌ارزی ۰/۶ دارد.

**جدول ۱: غلظت  $NO_x$  و CO و دمای گازهای خروجی در نرخ آتش ۱۷۲۵ کیلووات بر متر مربع در نسبت‌های هم‌ارزی و طول‌های مختلف**

**Table 1.  $NO_x$  concentration, CO concentration, and outlet gas temperature at  $FR=1725$  kW/m<sup>2</sup> for different equivalence ratio and height**

نتایج	L (cm)		
		۲۰	۱۵
$\phi=0/6$			
غلظت $NO_x$ (ppm)	۱۱	۹	۹
غلظت CO (ppm)	۵۴۹	۵۳۰	۵۹۳
$T_o$ (°C)	۴۴۶/۹	۳۹۸/۵	۳۷۸/۵
$\phi=0/9$			
غلظت $NO_x$ (ppm)	۱۲	۱۱	۱۱
غلظت CO (ppm)	۳۱۷	۲۲۰	۳۴۲
$T_o$ (°C)	۴۶۷/۱	۴۱۶/۳	۴۰۱/۲

در جدول ۲ مقادیر غلظت آلاینده‌های  $NO_x$  و CO برای دو سرمشعل با قطرهای ۴ و ۶ سانتیمتر برای دو نسبت هم‌ارزی متفاوت در نرخ آتش ۱۷۲۵ کیلووات بر متر مربع گزارش شده است. همان‌گونه که در این جدول مشخص است با افزایش قطر سرمشعل مقدار غلظت آلاینده  $NO_x$  در نسبت هم‌ارزی ۰/۶ حدود ۳۸ درصد و در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ حدود ۴۲ درصد کاهش پیدا کرده است که دلیل آن کاهش دمای گازهای خروجی از محفظه احتراق با افزایش قطر سرمشعل است. دلیل آن را نیز می‌توان به اختلاط بیشتر محصولات احتراق با مخلوط سوخت و هوا مربوط نمود که باعث کاهش دمای شعله و به دنبال آن باعث کاهش دمای محصولات خروجی می‌شوند. آلاینده CO نیز در هر دو نسبت هم‌ارزی گزارش شده با افزایش قطر سرمشعل، افزایش می‌یابد که با نتایج عددی گزارش شده توسط هاشمی و همکاران [۷] مطابقت دارد.

**جدول ۲: غلظت  $NO_x$  و CO و دمای گازهای خروجی در نرخ آتش ۱۷۲۵ کیلووات بر متر مربع در نسبت‌های هم‌ارزی و قطرهای مختلف**

**Table 2.  $NO_x$  concentration, CO concentration, and outlet gas temperature at  $FR=1725$  kW/m<sup>2</sup> for different equivalence ratio and diameter**

نتایج	D (cm)	
		۴
$\phi=0/6$		
غلظت $NO_x$ (ppm)	۱۴	۹
غلظت CO (ppm)	۵۷۸	۵۹۳
$T_o$ (°C)	۴۳۷/۸	۳۷۸/۵
$\phi=0/9$		
غلظت $NO_x$ (ppm)	۱۹	۱۱
غلظت CO (ppm)	۲۴۶	۳۴۲
$T_o$ (°C)	۴۶۹/۱	۴۰۱/۲

Heydari, Investigation of a flame holder geometry effect on flame structure in non-premixed combustion, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27, No. 11, pp. 3505-3512, 2013.

[7] S. Hashemi, N. Hajjaligol, K. Mazaheri, A. Fattahi, Investigation of Air Turbulence Intensity Effect on the Flame Structure in Different Flame Holder Geometry, *International Journal of Engineering-Transactions C: Aspects*, Vol. 26, No. 12, pp. 1423, 2013.

[8] M. Miguel-Brebion, D. Mejia, P. Xavier, F. Duchaine, B. Bedat, L. Selle, T. Poinsot, Joint experimental and numerical study of the influence of flame holder temperature on the stabilization of a laminar methane flame on a cylinder, *Combustion and Flame*, Vol. 172, pp. 153-161, 2016.

[9] S. Hong, S. J. Shanbhogue, K. S. Kedia, A. F. Ghoniem, Impact of the flame-holder heat-transfer characteristics on the onset of combustion instability, *Combustion Science and Technology*, Vol. 185, No. 10, pp. 1541-1567, 2013.

[10] S. Hashemi, H. F. Jounaghani, Experimental study of the effect of a simple flame holder on the stability of a non-premixed flame, *AmirKabir Journal of Science & Research*, In Press, 2016. (In Persian)

[11] M. Mahmoodi Arya, A. Fahimi Rad, H. Momahedi Heravi, Experimental investigation on the effect of CO<sub>2</sub> diluents on pollutants emission in propane-air non-premixed flames, *Energy Engineering Management*, Vol. 1, No. 2, pp. 31-40, 2012.

[12] J. I. Erete, K. J. Hughes, L. Ma, M. Fairweather, M. Pourkashanian, A. Williams, Effect of CO<sub>2</sub> dilution on the structure and emissions from turbulent, non-premixed methane-air jet flames, *Journal of the Energy Institute*, 2016.

[13] T. Boushaki, N. Merlo, C. Chauveau, I. Gökalp, Study of emission pollutants and dynamics of non-premixed turbulent oxygen enriched flames from a swirl burner, *Proceedings of the Combustion Institute*, 2016.

[14] H. Kobayashi, K. Oono, E.-S. Cho, H. Hagiwara, Y. Ogami, T. Niioka, Effects of turbulence on flame structure and NO<sub>x</sub> emission of turbulent jet non-premixed flames in high-temperature air combustion, *JSME International Journal Series B*, Vol. 48, No. 2, pp. 286-292, 2005.

[15] T. Terasaki, S. Hayashi, The effects of fuel-air mixing on NO<sub>x</sub> formation in non-premixed swirl burners, in *Proceeding of*, Elsevier, pp. 2733-2739.

[16] S.-H. Kim, M. Kim, Y. Yoon, I.-S. Jeung, The effect of flame radiation on the scaling of nitrogen oxide emissions in turbulent hydrogen non-premixed flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, No. 2,

مونواکسید حداکثر ۳۹ درصد افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین تغییر نرخ آتش در یک نسبت هم‌ارزی ثابت نشان می‌دهد که با افزایش نرخ آتش، میزان آلاینده ناکس و دمای گازهای خروجی به ترتیب حداکثر ۴۱ و ۱۷ درصد افزایش یافته و میزان آلاینده کربن مونواکسید تقریباً ثابت است.

### فهرست علائم

$A$	سطح مقطع سرمشعل ( $m^2$ )
$D$	قطر سرمشعل (m)
$FA$	نسبت سوخت به هوا
$FR$	نرخ آتش ( $kW/m^2$ )
$L$	طول سرمشعل (m)
$L_f$	طول شعله (m)
$LHV$	ارزش حرارتی پایین سوخت ( $kJ/m^3$ )
$N$	تعداد دفعات اندازه‌گیری
$P$	توان مشعل (kW)
$Q_f$	دبی حجمی گاز ( $m^3/s$ )
$T_o$	دمای گازهای خروجی ( $^{\circ}C$ )
$V_a$	سرعت هوای ورودی (m/s)
$W$	عدم قطعیت متغیر اندازه‌گیری شده‌ی وابسته
$w$	عدم قطعیت متغیر اندازه‌گیری شده‌ی مستقل
$X$	متغیر مستقل
$X'$	عدم قطعیت داده‌های آزمایشگاهی ناشی از تکرار آن‌ها
$\bar{x}$	میانگین حسابی داده‌های آزمایشگاهی
<b>علائم یونانی</b>	
$\sigma$	انحراف معیار مجموعه اندازه‌گیری‌ها
$\sigma_m$	انحراف معیار مقدار میانگین
$\phi$	نسبت هم‌ارزی
<b>زیرنویس</b>	
$act$	واقعی
$stoic$	استوکیومتری

### مراجع

- [1] R.-H. Chen, J. F. DRISCOLL, J. Kelly, M. Namazian, R. Schefer, A comparison of bluff-body and swirl-stabilized flames, *Combustion science and Technology*, Vol. 71, No. 4-6, pp. 197-217, 1990.
- [2] S. Hosokawa, Y. Ikeda, T. Nakajima, Effect of flame holder shape on vortex shedding, *32nd Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 1996.
- [3] G. Winterfeld, on processes of turbulent exchange behind flame holders, in *Proceeding of*, Elsevier, pp. 1265-1275.
- [4] A. Mestre, Combustion Researches and Reviews, *Butterworth's Scientific Publications*, London, 1955.
- [5] R. Soenoko, The Effect of a Flame Holder Shape Modification Toward the Diffusion Flame Stability Zone Shift, *World Applied Sciences Journal*, Vol. 8, No. 3, pp. 339-344, 2010.
- [6] S. Hashemi, N. Hajjaligol, A. Fattahi, K. Mazaheri, R.



- [19] P. Baziar, A. Hajipour, A. Fahimirad, M. M. Arya, H. Heravi, The Effect of Swirl on  $\text{NO}_x$  Formation in a Non-Premixed Propane/Air Flame, *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*, Vol. 5, No. 15, pp. 2175-2185, 2015.
- [20] R. Cheng, D. Littlejohn, W. A. Nazeer, K. Smith, Laboratory studies of the flow field characteristics of low-swirl injectors for adaptation to fuel-flexible turbines, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 130, No. 2, pp. 021501, 2008.
- [21] J. P. Holman, *Experimental Methods for Engineers*: McGraw-Hill, 1994.
- pp. 1951-1956, 2002
- [17] R. P. K. de Mello, C. A. Martins, A. O. de Toledo, M. T. de Mendonça, M. A. Ferreira, REYNOLDS NUMBER AND EQUIVALENCE RATIO EFFECTS ON  $\text{NO}_x$  EMISSION ON NON PREMIXED TURBULENT FLAMES, *19th International Congress of Mechanical Engineering*, 2007.
- [18] J. Oh, P. Heo, Y. Yoon, Acoustic excitation effect on  $\text{NO}_x$  reduction and flame stability in a lifted non-premixed turbulent hydrogen jet with coaxial air, *International journal of hydrogen energy*, Vol. 34, No. 18, pp. 7851-7861, 2009.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

S. A. Hashemi, H. Forozandeh, M. Mollamahdi, Experimental investigation of the effect of the flame holder geometry on flame length and  $\text{NO}_x$  and CO emissions in a non-premixed burner, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 51(4) (2019) 1-10.

DOI:



UNCORRECTED PROOF