



## بررسی آزمایشگاهی احتراق کم‌پیچش پیش‌آمیخته و اثر تغییر پارامترهای هندسی بر عملکرد آن

سید ایمان پیش‌بین<sup>۱\*</sup>، محسن قاضی‌خانی<sup>۲</sup>، سید محمدرضا مدرس رضوی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه خيام، مشهد، ایران (رئیس پژوهش و فناوری، شرکت گاز استان خراسان رضوی)

<sup>۲</sup> استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۱۱ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۰۷/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۲۵

### چکیده

احتراق کم‌پیچش، روشی کم‌هزینه و موثر را برای ایجاد پایداری در شعله‌های پیش‌آمیخته رقیق ارائه می‌دهد. پیش از این مطالعات متعددی درباره نحوه کارکرد مشعل‌های کم‌پیچش در شرایط مختلف فشار، سرعت مخلوط، نسبت هم‌ارزی و مشخصات هندسی متفاوت صورت گرفته است و عدد پیچش، به عنوان اصلی‌ترین پارامتر اثرگذار بر عملکرد این مشعل‌ها به صورت تابعی از ابعاد هندسی مشعل معرفی شده است. فاصله پیچنده از سر مشعل (فاصله درنگ)، یکی از پارامترهای اصلی در طراحی مشعل‌های کم‌پیچش است که به طور مستقیم در کاهش نرخ پیچش اثرگذار بوده، تاثیر آن بر عملکرد مشعل و عدد پیچش در مطالعات گذشته، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق، با برپایی یک بستر آزمون اثر تغییر فاصله پیچنده از سرمشعل در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف بر توزیع دما و رژیم شعله، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج، نشان می‌دهد افزایش فاصله درنگ، موجب افزایش میزان برخاستگی شعله و افزایش بازه عملکرد پایدار آن می‌شود؛ همچنین نتایج نشان می‌دهد، شکل خاص شعله برخاسته حاصل از احتراق کم‌پیچش که کاسه‌ای و واگراست، موجب توزیع یکنواخت دما داخل محفظه احتراق شده، هم‌زمان موجب کاهش تولید آلاینده  $\text{NO}_x$  می‌شود.

**کلمات کلیدی:** احتراق کم‌پیچش؛ پیش‌آمیخته؛ وزش شعله؛ پیچنده

## Experimental investigation on low swirl premixed combustion and effects of geometrical parameters on its performance

Seyyed Iman Pishbin<sup>1\*</sup>, Mohsen Ghazikhani<sup>2</sup>, Seyyed MohammadReza Modarres Razavi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assis. Prof., Mech. Eng., Khayyam Univ, Mashhad, Iran (Head of R&T Department of Khorasan-e-Razavi Gas Co),

<sup>2</sup> Prof., Mech. Eng., Ferdowsi Univ. of Mashhad, Mashhad, Iran

### Abstract

Low swirl burner provides an effective and low cost solution for stable lean premixed combustion. Several studies have been conducted on the performance of these burners in different pressures, temperatures, capacities, mixture velocities and equivalence ratios. The main design parameters of low swirl burners are the swirl number and the recess length. The objective of this paper is the investigation of recess length effects on the burner performance. A rig test has been established and utilized to study the effects of different equivalence ratios and recess lengths on the temperature distribution and flame regime of low swirl burners. Results revealed that increasing the recess length causes the increase in axial bulk velocity and hence the lifted flame would be stable in wider range of equivalence ratios. Observations also show the significant effect of the specific divergent flame regime of low swirl burners on result in uniform temperature distribution inside the combustion chamber and lower  $\text{NO}_x$  production

**Keywords:** Low Swirl Combustion; Premixed; Blow off; Swirler

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۵۳۱۰۷۹۵۷ فکس: ۰۵۱۳۷۶۴۳۷۳۹

آدرس پست الکترونیک: [pishbin@nigc-khrz.ir](mailto:pishbin@nigc-khrz.ir)؛ [i.pishbin@khayyam.ac.ir](mailto:i.pishbin@khayyam.ac.ir)

## ۱- مقدمه

معضل امروز جهان از تامین انرژی به سمت آلودگی محیط زیست در حال چرخش است. مرزهای زمینی، کشورها را از یکدیگر جدا می‌کنند، اما آسمان مشترک موجب می‌شود، انتشار آلاینده‌ها، از مرزها گذشته و جوامع دیگر را تحت تاثیر قرار دهند. دانشمندان سالهاست تلاش می‌کنند راهکارهایی به منظور کاهش انتشار آلاینده در فرآیندهای احتراقی بیابند. یکی از این راهکارها، استفاده از احتراق پیش آمیخته است. این روش احتراقی مشابه هر فناوری جدید، نقاط قوت و وضعی دارد. تاکنون تلاش‌های متعددی برای یافتن راهکارهایی به منظور افزایش پایداری احتراق پیش آمیخته و در عین حال، کاهش تولید آلاینده‌های آن انجام شده است. نشر بیش از حد اکسید ازت در محیط، باران‌های اسیدی را در محیط‌های شهری و صنعتی منجر گردیده است؛ لذا به‌کارگیری روش‌هایی جهت کاهش آلاینده‌ها به طور کلی و کاهش اکسیدهای ازت به طور خاص ضروری است. به منظور کاهش میزان تولید  $NO_x$ ، مکانیزم‌های متعددی با توجه به روش و عامل تولید آن به‌کار گرفته شده است. عمده منبع تولید  $NO_x$  در مشعل‌های گازسوز،  $NO_x$  حرارتی ناشی از قرارگیری محصولات احتراق در دماهای بالای ۱۶۰۰ تا ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد است، لذا تمرکز راه حل‌ها، بر کاهش این دما قرار گرفته است. این راهکارها را می‌توان به سه گروه کلی تقسیم کرد [۱-۲].

الف. کاهش دمای حداکثری احتراق و کاهش زمان ماند در دمای ماکزیمم: در این روش‌ها، تمرکز بر کاهش دمای احتراق و از این طریق کاهش تولید اکسید ازت است. در این گروه، روش‌های متعددی را می‌توان طبقه بندی کرد.

الف. ۱- بازچرخش محصولات احتراق: در این روش، بخشی از گازهای خروجی دوباره به محفظه احتراق وارد می‌شود. ورود مقداری دود به محفظه احتراق، موجب افزایش ظرفیت گرمایی و نیز کاهش میزان نیتروژن در هوای ورودی می‌شود و در نتیجه با وجود ثابت ماندن حرارت تولیدی، دمای محصولات احتراق پایین آمده و اکسید ازت کمتری تولید می‌شود. نیاز به استفاده از فن‌های دما بالا، جزو نقاط ضعف این روش و موجب پرهزینه شدن این راهکار می‌شود [۳].

الف. ۲- احتراق دو مرحله‌ای: در این روش، هوا را به صورت دو مرحله‌ای وارد می‌کنند. در این روش، احتراق با

ورود قسمتی از هوا آغاز می‌شود و در مرحله دوم، قسمت بعدی هوا وارد شده و لذا دمای شعله و میزان اکسید ازت کاهش می‌یابد.

الف. ۳- تزریق بخار: تزریق بخار در محفظه احتراق، موجب کاهش دمای محصولات احتراق و کاهش تولید  $NO_x$  می‌شود، لیکن حرارت جذب شده توسط بخار آب و خروج آن از دودکش، موجب کاهش راندمان کلی سیستم می‌شود.

ب. کاهش اکسید ازت به‌وسیله فرآیندهای پس از احتراق: در این روش از کاتالیست، جهت پالایش اکسید ازت تولید شده در دودکش استفاده می‌شود. این روش از نظر کارایی بسیار موثر بوده، لیکن هزینه بسیار بالایی دارد.

ج. شعله با دمای پایین: در این روش، تلاش می‌شود دمای محصولات احتراق همواره پایین‌تر از دمای تشکیل  $NO_x$  حرارتی قرار گیرد. دو روش عمده در این گروه قرار می‌گیرند.

ج- ۱- احتراق بدون شعله<sup>۱</sup>: در این فناوری با استفاده از کنترل میزان اکسیژن ( $3\% < O_2 < 5\%$ ) و افزایش دمای هوای ورودی به بالاتر از دمای خود اشتعالی مخلوط، توزیع همگونی از واکنش شیمیایی بین سوخت و هوا در کل محفظه احتراق به‌وجود می‌آید. نقطه ضعف این روش، هزینه بر بودن افزایش دمای هوا بوده که راندمان کلی انرژی سیستم را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد [۴].

ج- ۲- احتراق رقیق: یکی از بهترین گزینه‌ها برای کاهش آلاینده‌های اکسید ازت است [۵]. در این روش با کاهش نسبت هم ارزی (نسبت سوخت به هوای موجود به نسبت سوخت به هوای تئوری) به مقادیری بسیار پایین‌تر از یک، ترکیب سوخت و هوا رقیق شده و از این طریق، دمای احتراق کاهش پیدا می‌کند و لذا تولید  $NO_x$  نیز کاهش پیدا می‌کند. نقطه ضعف این روش، بروز ناپایداری در احتراق است. به منظور برطرف کردن این نقطه ضعف، از جریان پیچشی و پیچنده<sup>۲</sup> به منظور ایجاد پیچش در مخلوط سوخت و هوای پیش‌آمیخته استفاده می‌شود؛ احتراق پیچشی، ابزار قدرتمند به منظور کاهش آلاینده‌های احتراق و افزایش بازه عملکردی شعله تا محدوده‌های بسیار رقیق است. در این

<sup>1</sup> Flameless

<sup>2</sup> Swirler

جریان مماسی هواست. یگی‌آن<sup>۶</sup> و چنگ در سال ۱۹۹۶ از پیچنده مطابق شکل ۲ برای ایجاد جریان پیچشی بهره بردند، تا از این طریق ضمن ساده‌سازی امکان ساخت، عملکرد بهتری از این نوع مشعل به دست آید [۵].

مطابق شکل ۲، پیچنده از دو قسمت تشکیل شده است. بخشی از مخلوط سوخت و هوا از صفحه مشبک میانی عبور کرده، جریان مغشوش محوری را شکل می‌دهد، بخش دیگری از مخلوط نیز با عبور از میان پره‌ها جریان پیچشی اطراف را به‌وجود می‌آورد. این دو جریان پس از عبور از پیچنده با هم ترکیب شده، در نهایت از سرمشعل خارج می‌شود. برای مشعل‌های پیچشی، دو حد ناپایداری وجود دارد که شامل وزش<sup>۷</sup> و پس‌زنی شعله<sup>۸</sup> است. هنگامی که سرعت سوختن شعله از سرعت مخلوط ورودی خیلی کمتر باشد، شعله از سطح مشعل بسیار فاصله گرفته، در نهایت وزش کرده و خاموش می‌شود. بالعکس هنگامی که سرعت سوختن شعله از سرعت مخلوط ورودی بیشتر شود، در این زمان شعله به سمت داخل مجرای مشعل کشیده شده، ممکن است سبب تخریب مشعل و حتی انفجار شود. در مشعل‌های کم‌پیچش، دو رژیم متفاوت شعله بر اساس محل تشکیل آن قابل مشاهده است. محل تشکیل شعله، مکانی است که سرعت شعله با سرعت مخلوط سوخت و هوا برابر شود. در نسبت‌های هم‌ارزی نزدیک نسبت استوکیومتریک که سرعت شعله آشفته بالاست، شعله به بدنه مشعل چسبیده<sup>۹</sup> است؛ اما با رقیق شدن سوخت و کاهش نسبت هم‌ارزی و به تبع آن کاهش سرعت شعله آشفته، رژیم متفاوتی از شعله به‌وجود آمده و شعله در بالای مشعل و به صورت برخاسته<sup>۱۰</sup> تشکیل می‌شود. لذا به دلیل استفاده هم‌زمان از جریان پیچشی عبوری از پره‌ها و جریان مغشوش عبوری از صفحه مشبک مرکزی (شکل ۲)، سرعت شعله آشفته تغییر پیدا کرده و در نقطه‌ای در بالای مشعل سرعت مخلوط سوخت و هوا با سرعت شعله آشفته برابر شده، شعله‌ای واگرا و کاسه‌ای شکل تشکیل می‌شود.

فناوری از پیچش به عنوان ابزاری به منظور برقراری پایداری استفاده می‌شود. به همین دلیل اصلی‌ترین پارامتر گروه‌بندی این مشعل‌ها، عدد بی‌بعدی به نام عدد پیچش تعیین شده است [۶]. این عدد بر اساس حاصل تقسیم شار تکانه زاویه‌ای بر حاصل ضرب شار تکانه محوری در شعاع مشعل تعریف می‌شود (رابطه ۱). شعله‌هایی با عدد پیچش کمتر از ۰/۶ کم‌پیچش و شعله‌های با عدد پیچش بیش از ۰/۶ را شعله‌های پرپیچش می‌نامند [۷].

$$S = \frac{G_{ang}}{R_b G'_x} = \frac{\int_0^{\infty} \rho U W r^2 dr}{R_b \int_0^{\infty} \rho (U^2) r dr} \quad (1)$$

که در رابطه فوق،  $G_{ang}$  اندازه حرکت زاویه‌ای در بخش پیچشی است و  $G'_x$  شار اندازه حرکت خطی در هسته مرکزی بدون پیچش و حلقه‌های پیچشی است. همچنین  $R_b$  شعاع مشعل و  $U$  سرعت محوری و  $W$  سرعت زاویه‌ای مخلوط داخل مشعل است. امروزه در بیشتر توربین‌های گاز از مشعل‌های پرپیچش<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. در این نوع شعله‌ها پدیده‌ای به نام شکست گردابه‌ها، سبب به‌وجود آمدن ناحیه بازچرخش داخلی (IRZ<sup>۲</sup>) در نزدیکی دهانه مشعل شده که موجب پایداری آن می‌شود (شکل ۱-چپ). در این حالت، محصولات احتراق به دلیل چرخش بیشتر در محفظه، زمان بیشتری را در محفظه متوقف مانده و موجب افزایش تولید آلاینده  $NO_x$  می‌شوند.

برای برطرف کردن این معضل، در سال ۱۹۹۲ چنگ<sup>۳</sup>، مشعل کم‌پیچش<sup>۴</sup> را معرفی کرد [۸]. در این نوع مشعل‌ها، ناحیه بازگشتی نزدیک دهانه (IRZ) حذف شده و برای پایداری نگه داشتن شعله، جریان هوا به صورت مماسی توسط نازل‌هایی به مجرا وارد شده، پس از مخلوط شدن با جریان سوخت که به صورت محوری در جریان است از سرمشعل خارج می‌شود. این تکنولوژی را مشعل پیچشی تزریقی (LSI)<sup>۵</sup> می‌نامند [۹]. (مطابق شکل ۱-راست). پایداری این مشعل‌ها، تابع عدد پیچش و نرخ جریان محوری سوخت و

<sup>6</sup> Yegian

<sup>7</sup> Blow off

<sup>8</sup> Flash back

<sup>9</sup> Attached flame

<sup>10</sup> Lifted flame

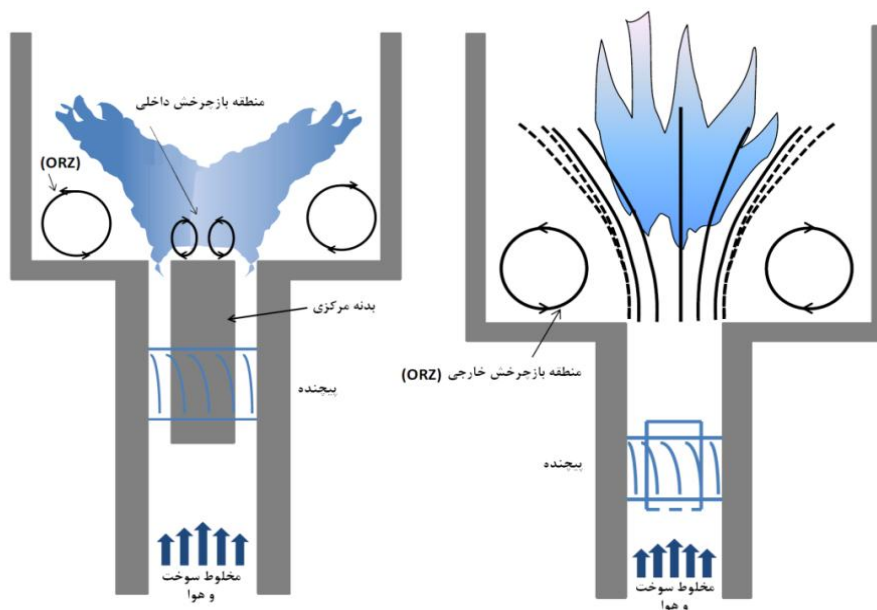
<sup>1</sup> High swirl burners (HSB)

<sup>2</sup> Inner recirculation zone (IRZ)

<sup>3</sup> Cheng

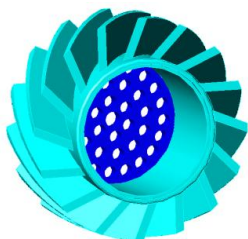
<sup>4</sup> Low swirl burner (LSB)

<sup>5</sup> Low swirl injector (LSI)



شکل ۱- تصویر شماتیک تفاوت ساختاری مشعل‌های کم پیچش (راست) و پرپیچش (چپ). در شکل سمت چپ، تشکیل ناحیه بازچرخش داخلی در مشعل‌های پرپیچش مشاهده می‌شود.

بازگشتی در پایین دست شعله قرار داشته، تأثیری بر پایداری شعله ندارد [۸]. چنگ و لیتل جان<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۸، شکل شعله را داخل محفظه احتراق بررسی کردند. این بررسی‌ها نشان می‌دهد زمانی که شعله کم پیچش در محفظه احتراق قرار می‌گیرد، یک ناحیه بازگشتی قوی در گوشه محفظه احتراق (مطابق شکل ۱-راست) اتفاق می‌افتد که سبب باز شدن و واگرایی شعله می‌شود [۱۲].



شکل ۲- بیچنده به‌کارگرفته شده در این تحقیق

با توجه به اهمیت میزان آلاینده‌گی و پتانسیل این فناوری در کاهش  $\text{NO}_x$ ، مطالعات متعددی در این زمینه انجام شده است. جانسون و همکاران در تحقیقات خود، تولید

از مزایای مهم مشعل‌های کم پیچش در شرایط رقیق، دمای شعله پایین و برخاستگی شعله است که موجب می‌شود، تأثیر دمایی بسیار اندکی بر بدنه مشعل بگذارد و از آسیب آن در درازمدت جلوگیری شود.

چنگ در سال ۱۹۹۸ با مطالعه روی آستانه وزش شعله نشان داد که رابطه خطی بین سرعت شعله آشفته و شدت آشفستگی روی طیف بسیار گسترده‌ای از شدت‌های آشفستگی وجود دارد. این یک خاصیت مهم است که قادر می‌سازد مفهوم احتراق کم پیچش برای سیستم‌های احتراقی بسیار بزرگ صنعتی، قابل اجرا باشد [۱۰]. همچنین چنگ مشعل-های کم پیچش را با استفاده از روش LDA<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار داد و ملاحظه کرد که پروفیل سرعت شعله کم سوخت، بسیار شبیه به پروفیل سرعت جریان بدون احتراق کم پیچش است [۱۱]. جانسون<sup>۲</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۵، مشعل‌های کم پیچش و پرپیچش را بررسی و مقایسه کردند و نتایج آنها نشان داد که در شعله‌های کم پیچش نیز همانند شعله‌های پرپیچش، ناحیه بازگشتی وجود دارد، اما این ناحیه

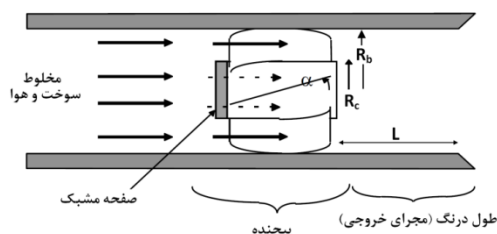
<sup>۱</sup> Laser doppler anemometry

<sup>۲</sup> Johnson

<sup>۳</sup> Littlejohn

می‌شود. [۱۶]. بیرر<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۳، اثر هیدروژن و اختلاط آن با متان را در فشار و دماهای بالا در مشعل کم پیچش مورد بررسی قرار داده، نشان داده‌اند سرعت شعله آشفته این مخلوط تقریباً دو برابر سرعت احتراق متان در شرایط یکسان ورودی بوده، فشار و دمای ورودی تاثیر اندکی در شرایط سرعت شعله آشفته دارد [۱۷].

مشابه هر پدیده دیگری در علم مکانیک، سه گروه خواص هندسی، سینماتیکی و دینامیکی بر عملکرد احتراق اثر گذارند. در یک پیچنده، پارامترهای هندسی متعددی اثر گذارند. مطابق شکل ۳، شعاع مشعل ( $R_b$ )، شعاع قسمت مرکزی (صفحه سوراخ دار -  $R_c$ )، زاویه پره‌ها ( $\alpha$ )، تعداد پره‌ها، درصد انسداد صفحه مشبک، فاصله درنگ ( $L$ ) یا فاصله پیچنده از سرمشعل (Recess length)، عوامل اصلی هندسی، اثرگذار بر عملکرد مشعل هستند. مطالعات متعددی درباره نقش هندسه پیچنده در عملکرد مشعل تاکنون انجام شده است. در یکی از جامع‌ترین تحقیقات، بالاچی<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲ با ساخت مشعل‌هایی با ظرفیت‌ها و زوایای پیچش متفاوت، اثرات هریک را مورد مطالعه قرار دادند و بر این اساس، بازه‌های مشخصی برای طراحی یک مشعل پایدار کم پیچش پیشنهاد شده است [۱۸].



شکل ۳ - تصویر شماتیک مشعل کم پیچش و پارامترهای هندسی حاکم بر آن

چنگ به منظور محاسبه عدد پیچش با استفاده از ابعاد هندسی، رابطه (۲) را ارائه کرده است. این عدد بی بعد، مهمترین پارامتر در بررسی عملکرد مشعل‌های پیچشی عنوان شده است. مطابق رابطه (۱)، چنانچه از خواص هندسی مشعل استفاده شود، چنگ پیشنهاد کرده که می‌توان رابطه (۱) را با در نظر گرفتن فرضیاتی، برای مشعل-

آلاینده در مشعل کم پیچش (LSB) و مشعل پرپیچش (HSB) را مقایسه کردند. نتایج این بررسی‌ها، نشان داد که تولید آلاینده  $NO_x$  شعله کم پیچش به دلیل حذف منطقه بازچرخش داخلی و کاهش زمان ماندگاری<sup>۱</sup>، بسیار کمتر از شعله پرپیچش است [۸]. چنگ و همکاران در سال ۲۰۰۶، تولید آلاینده‌های مشعل کم پیچش پره دار (LSB) و تزریقی (LSI) را در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که شعله‌های حاصل از هر دو مشعل در نسبت‌های هم‌ارزی کمتر از ۰/۸ به مقدار یکسانی آلاینده  $NO_x$  تولید می‌کنند. همچنین وابستگی خطی بین سرعت شعله آشفته و سرعت مخلوط سوخت و هوا وجود دارد که موجب می‌شود در بازه گسترده‌ای از ظرفیت مشعل، وضعیت پایدار مشعل باقی بماند [۱۳]. سکوارا<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۷ با شبیه‌سازی احتراق، نشان دادند که کاهش ماندگاری محصولات احتراق همراه با کاهش دمای احتراق، اصلی‌ترین عواملی هستند که موجب تولید آلاینده  $NO_x$  بسیار اندک در مشعل‌های کم پیچش می‌شوند [۱۴]. لگرنند<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲، شکل شعله را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی‌ها، نشان می‌دهد که میدان جریان شعله کم پیچش و جریان سرد (غیرواکنشی) کم پیچش مشابه‌هایی به هم داشته، برخی تفاوت‌های موجود ناشی از نبود آشفتنگی حاصل از احتراق در جریان‌های سرد کم پیچش است [۱۵]. مطالعاتی نیز درباره اثر ترکیبات مختلف سوخت بر عملکرد مشعل صورت گرفته است. چنگ و همکاران در سال ۲۰۱۰، نشان دادند که ترکیبات مختلف سوخت بر کارایی کلی مشعل و میزان آلاینده‌گی آن تاثیر چندانی نداشته، در همه موارد عملکرد مشابهی توسط مشعل کم پیچش ایجاد می‌شود [۹]. عمادی<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲، به بررسی تغییرات ساختار شعله ناشی از غنی‌سازی با هیدروژن و افزایش فشار در شعله‌های متان-هوا در مشعل کم پیچش پرداخته‌اند. نتایج تحقیق، نشان می‌دهد افزودن ۲۰ درصد مولی هیدروژن، موجب ۷ درصد تغییر و افزودن ۴۰ درصد هیدروژن، موجب ۳۵ درصد تغییر محدوده پایداری

<sup>1</sup> Residence time

<sup>2</sup> Sequera

<sup>3</sup> Legrand

<sup>4</sup> Emadi

<sup>5</sup> Beerer

<sup>6</sup> Ballachey

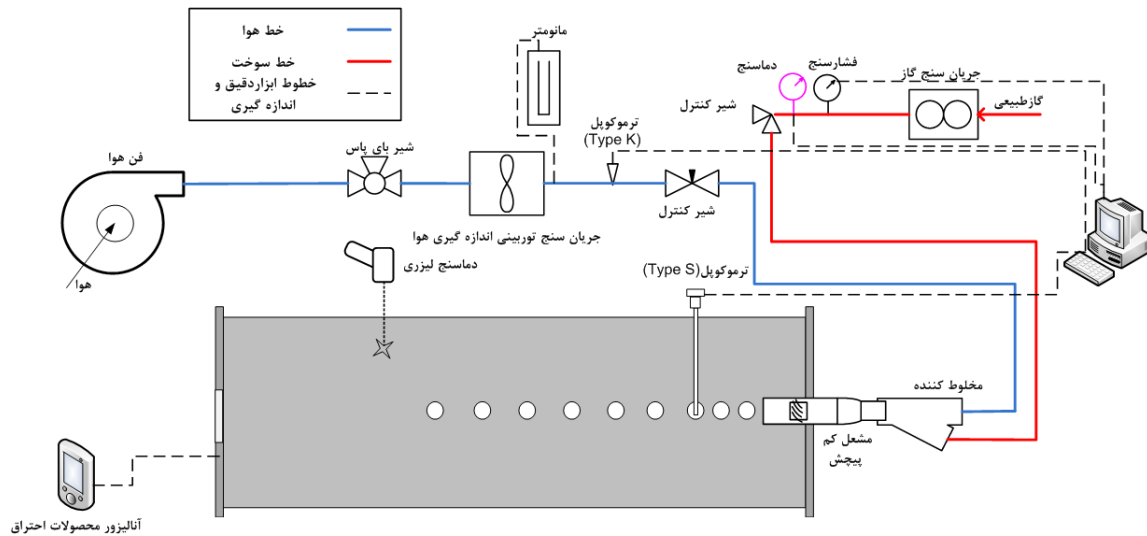
## ۲- روش تجربی

تحقیقات نشان می‌دهد، اگر شعاع محفظه احتراق را ۳ تا ۵ برابر بزرگتر از شعاع مشعل در نظر گرفته شود، محفظه احتراق تأثیری بر ساختار شعله ندارد [۱۱]. لذا در این تحقیق، از محفظه احتراق با شعاع ۸ برابر شعاع مشعل استفاده شده است. برای بررسی نقش و تاثیر فاصله درنگ در عملکرد مشعل، پیچنده و سرمشعل طوری طراحی شده‌اند که امکان جابجایی پیچنده وجود داشته باشد، مشعل ساخته شده (مطابق شکل ۲)، دارای یک پیچنده با ۱۶ پره با زاویه ۴۰ درجه بوده، قطر مشعل ۶۹ میلی‌متر و قطر مجرای داخلی آن ۴۰ میلی‌متر است؛ همچنین از یک صفحه مشبک با ۳۳ سوراخ در قسمت میانی پیچنده استفاده شده، لبه خروجی سرمشعل با زاویه ۴۵ درجه پخ زده شده تا از تغییر ناگهانی جریان در خروجی مشعل جلوگیری شود. عدد پیچش مشعل ساخته شده ۰/۵۶ است. در شکل ۴، شمای بستر تست و آزمون و تجهیزات اندازه‌گیری آن نشان داده شده است. مطابق شکل ۴، هوا توسط فن تامین می‌شود که با نصب چند شیر سوزنی در مسیر سوخت و هوا کنترل دبی آن‌ها میسر گردیده است. دبی سوخت و دبی هوا، توسط جریان‌سنج قرائت می‌شود. همچنین دما و فشار سوخت و هوا توسط سنسورهای اندازه‌گیری و در دیتالاگر ذخیره می‌شود. با توجه به مشخص بودن دبی و چگالی مخلوط و قطر مجرا، مقادیر سرعت و ظرفیت مشعل قابل محاسبه است. همچنین با قراردادن مشعل در محفظه احتراق، عملکرد آن در تولید آلاینده و نیز توزیع دمای داخل محفظه احتراق، مورد بررسی قرار گرفته است. برای اندازه‌گیری محصولات احتراق از دستگاه تستو مدل ۳۵۰ (Testo 350-XL)، استفاده شده است.

های کم پیچش به صورت رابطه ۲ ساده سازی کرد [۵]. لذا با فرض توزیع یکنواخت سرعت محوری، شار اندازه حرکت خطی برای دو ناحیه مشعل، عدد پیچش به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$S = \frac{2}{3} \tan \alpha \frac{1-R^3}{1-R^2 + [m^2(1/R^2 - 1)^2]R^2} \quad (2)$$

که در آن،  $U_a$  سرعت میانگین محوری در قسمت پیچشی اطراف است و  $U_c$ ، سرعت میانگین محوری در قسمت مرکزی مجرا است.  $R$  نسبت شعاع مرکز بدنه به مشعل است:  $R = R_c/R_b$ . این عبارت با فرض اینکه  $U_c/U_a$  با  $m$  که نسبت شار جرمی  $m = m'_c/m'_a$  است، هم ارز باشد، ساده‌تر می‌شود. که  $m'_c$ ، مربوط به جریان جرمی میانی و  $m'_a$ ، مربوط به قسمت اطراف است. مطابق رابطه فوق، تمامی پارامترهای هندسی مشعل به جز فاصله درنگ ( $L$ ) در رابطه اثرگذار بوده، چنگ بازه  $D < L < 2D$  را برای مشعل‌های پیچشی پیشنهاد داده است. با توجه به اینکه فاصله مذکور نقش مهمی در میزان اختلاط سوخت و هوا داشته، از طرفی افزایش طول آن می‌تواند در کاهش میزان پیچش جریان اثر گذار باشد. در این مطالعه، به بررسی تاثیر فاصله پیچنده تا سرمشعل و نقش آن در عملکرد احتراق پرداخته شده است. همچنین در مطالعات گذشته، توزیع دما در محفظه احتراق با توجه به نوع و شکل شعله مشعل کم پیچش که واگرا و پخشی است، کمتر مورد توجه قرار گرفته که در مطالعه پیش رو، با قرار دادن مشعل در محفظه احتراق و قرائت نقطه به نقطه دمای داخل محفظه به بررسی اثر نسبت هم ارزی و اثر فاصله پیچنده از سر مشعل (فاصله درنگ)، در توزیع دمای داخل محفظه احتراق پرداخته شده است.



شکل ۴- بستر تست و آزمون و تجهیزات اندازه‌گیری

جدول ۲- ترکیبات گاز طبیعی

درصد مولی (%)	فرمول گاز	درصد مولی (%)	فرمول گاز
۰/۰۲۶	n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	۹۸/۲۳۱	CH <sub>4</sub>
۰/۰۳۹	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> <sup>+</sup>	۰/۵۵۱	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
۰/۵۰۹	CO <sub>2</sub>	۰/۰۵۲	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
۰/۴۹۶	N <sub>2</sub>	۰/۰۴۱	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
۳ ppm	H <sub>2</sub> S	۰/۰۳۳	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
ارزش حرارتی: ۸۰۸۰/۱۵۳ kcal/m <sup>3</sup>		۰/۰۲۲	i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>

### ۳- بحث نتایج

در این قسمت، به بررسی نتایج حاصل از بررسی‌های تجربی پرداخته می‌شود. علی‌رغم تحقیقات گسترده در زمینه مشعل‌های کم پیچش، موضوع توزیع دمایی داخل محفظه احتراق، کمتر مورد توجه قرار گرفته، لذا در این تحقیق با تغییر نسبت هم‌ارزی، تاثیر آن در پروفیل دمای داخل محفظه احتراق در مقاطع مختلف داخل کوره به وسیله ترموکوپل نوع S اندازه‌گیری شده است. مطابق نمودارهای زیر، توزیع دمای شعاعی در سطح شعله (شکل ۵)، روی شعله (شکل ۶) و بالای آن (شکل ۷)، نشان داده شده است.

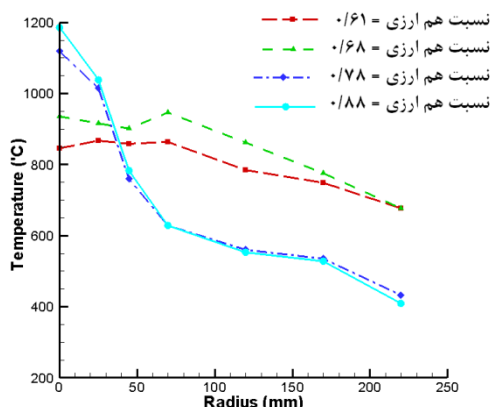
با بررسی سه نمودار فوق، دو رژیم متفاوت از توزیع دما داخل محفظه احتراق قابل مشاهده است. در واقع با رقیق شدن سوخت، دمای ماکزیمم شعله کاهش می‌یابد. از طرفی مطابق شکل ۶ و شکل ۷ با کاهش نسبت هم‌ارزی ۰/۷۸ به ۰/۶۸، رژیم شعله از حالت

این دستگاه پارامترهای (O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>) را اندازه‌گیری می‌کند. در جدول ۱، مشخصات تجهیزات اندازه‌گیری، خطاها و عدم قطعیت تجهیزات ارائه شده است. از گاز طبیعی با مشخصات مندرج در جدول ۲ در این تحقیق استفاده شده است.

جدول ۱- تجهیزات اندازه‌گیری، خطاها و عدم قطعیت

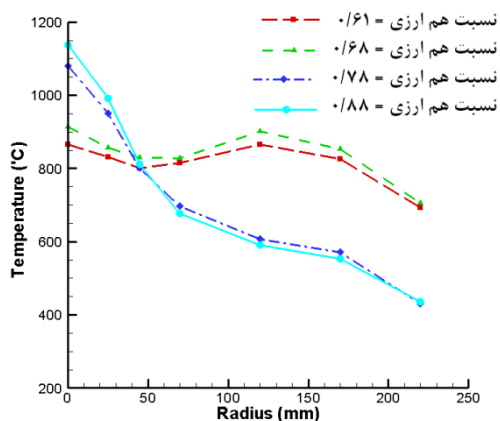
تجهیز	نمونه	واحد	خطای مطلق	دقت	انحراف معیار
آنالیزور گاز تستر ۳۵۰	O <sub>2</sub>	volume %	۰/۰۰۸	۰/۰۱	
	CO <sub>2</sub>	volume %	۰/۰۰۸	۰/۰۱	
	H <sub>2</sub>	ppm	-	۱	
	UHC	ppm	-	۱	
	CO	ppm	۱۰	±۳%	
	NO <sub>2</sub>	ppm	۵	۰/۱	
	NO	ppm	۱۰	۱	
	NO <sub>x</sub>	ppm	۱۰	۱	
	واحد	دمای مرجع	خطای مطلق	عدم قطعیت	
ترموکوپل نوع S	°C	۸۰۰/۷	-۰/۷۰		
	°C	۱۰۰۰/۵	-۰/۵۰	±۲/۱۰°C	
	°C	۱۲۰۰/۸	-۰/۸۰		
	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /h)	Q <sub>min</sub> (m <sup>3</sup> /h)	دقت استاندارد		
جریان سنج توربینی هوا	۶/۴	۱۶۰	±۳%	از ۰/۲ تا Q <sub>min</sub>	
			±۱%	از Q <sub>max</sub> تا ۰/۲ Q <sub>max</sub>	
جریان سنج دیافراگمی	۰/۱۶	۲۵	±۳%	از 2Q <sub>min</sub> تا Q <sub>min</sub>	
			±۲%	از Q <sub>max</sub> تا 2Q <sub>min</sub>	





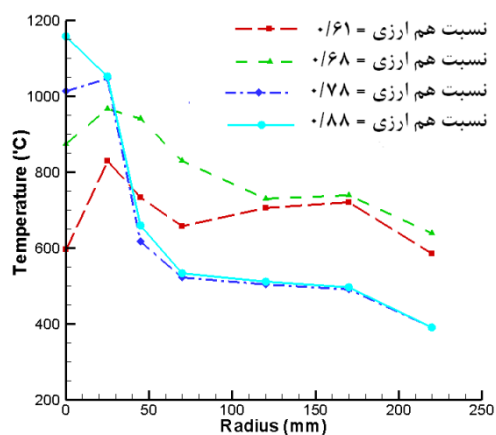
شکل ۶ - توزیع دمای شعاعی در ۱۲۲ میلی متری سرمشعل در ۴ نسبت هم ارزی مختلف و فاصله  $L=2R$

همچنین در شکل ۸، توزیع دمای محوری داخل کوره نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با کاهش نسبت هم‌ارزی از ۰/۸۸ به ۰/۶۱ و رقیق شدن سوخت، ماکزیمم دمای شعله حدود ۴۰ درصد کاهش داشته است. از طرفی بین کاهش نسبت هم ارزی و کاهش دمای محوری، رابطه مستقیمی قابل مشاهده بوده، به تدریج با رقیق شدن مخلوط، دمای اندازه‌گیری روی محور در نیمه ابتدایی محفظه احتراق کاهش داشته، اما در نیمه دوم محفظه تقریباً در هر چهار نسبت هم‌ارزی، پروفیل دما مشابه بوده است.



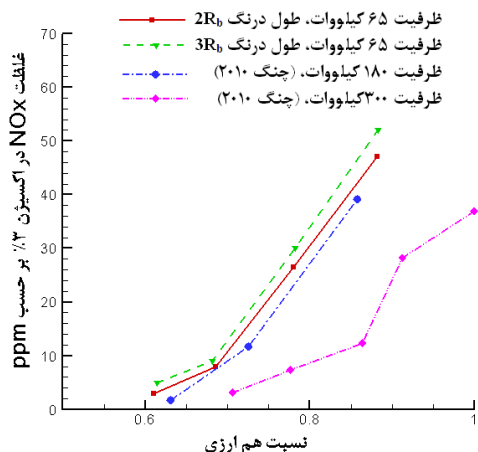
شکل ۷ - توزیع دمای شعاعی در ۱۸۳ میلی متری سرمشعل در ۴ نسبت هم ارزی مختلف و فاصله  $L=2R$

چسبیده به حالت برخاسته تغییر می‌کند؛ لذا توزیع دما نیز مطابق شکل ۷ در بالای مشعل به صورت یکنواخت‌تری توزیع می‌شود. همان‌طور که در ابتدا اشاره گردید، یکی از عوامل اثرگذار در تشکیل اکسید ازت، دمای ماکزیمم شعله است. لذا مشاهده می‌شود در شعله‌های پیش‌آمیخته کم‌پیچش علاوه بر تاثیر رقیق شدن سوخت در کاهش دمای ماکزیمم، تغییر رژیم شعله از حالت چسبیده به حالت برخاسته نیز در کاهش بیشتر اکسید ازت موثر است که نتایج آن در ادامه ارائه خواهد گردید. همچنین خاصیت پخشی شعله برخاسته مطابق شکل های ۵ الی ۷ نشان می‌دهد، محصولات احتراق با دمای بالاتری در مجاورت بدنه کوره در نسبت‌های هم ارزی ۰/۶۸ و ۰/۶۱ که شعله برخاسته بوده قرار گرفته‌اند. این بدان معناست که علی‌رغم رقیق شدن سوخت و کاهش دمای ماکزیمم شعله، هوای داغ با دمای بالاتری در رژیم برخاسته شعله کم‌پیچش، به بدنه محفظه احتراق رسیده است.

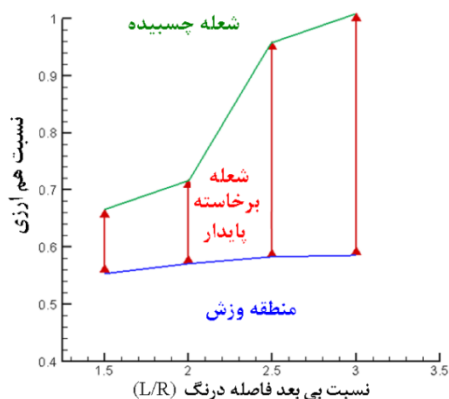


شکل ۵ - توزیع دمای شعاعی در فاصله ۵۲ میلی متری از سرمشعل در ۴ نسبت هم ارزی مختلف و فاصله  $L=2R$





شکل ۹- میزان غلظت NO<sub>x</sub> در مشعل کم پیش‌در نسبت- های هم ارزی مختلف و دو طول درنگ مختلف

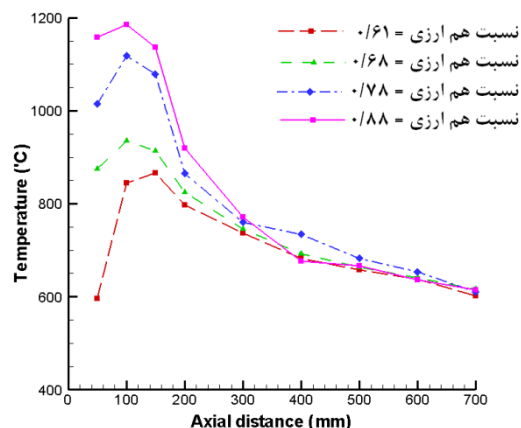


شکل ۱۰- تغییر طول درنگ و تاثیر آن در بازه برخاستگی شعله در مشعل پیش‌در با عدد پیش‌در S=0.56

درنگ) در وزش مشعل و تغییرات آن اثر چندانی نداشته است.

به منظور بررسی تاثیر تغییر نسبت هم ارزی و نیز بررسی اثر تغییر طول درنگ در عملکرد احتراق، با قراردادن مشعل در محفظه احتراق، به صورت نقطه به نقطه دمای محفظه و میزان آلاینده تولیدی نیز در دودکش اندازه‌گیری شده است.

در شکل‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴، کانتورهای دمایی داخل محفظه احتراق برای دو نسبت هم ارزی (φ) و دو فاصله درنگ (L) مختلف ترسیم شده‌اند. برای تولید این کانتورها، دمای داخل محفظه احتراق در ۴۲ نقطه به‌وسیله ترموکوپل نوع S قرائت شده، سپس با استفاده از نرم افزار

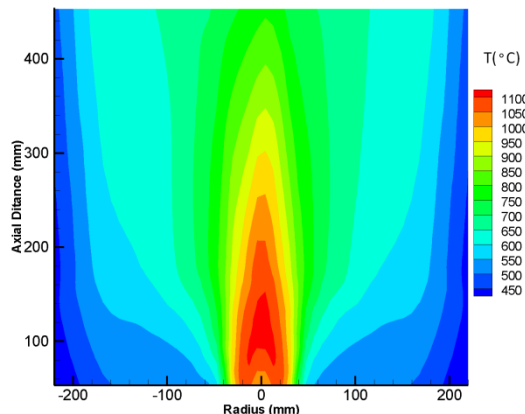


شکل ۸- توزیع دمای محوری در ۴ نسبت هم ارزی مختلف و فاصله L=2R

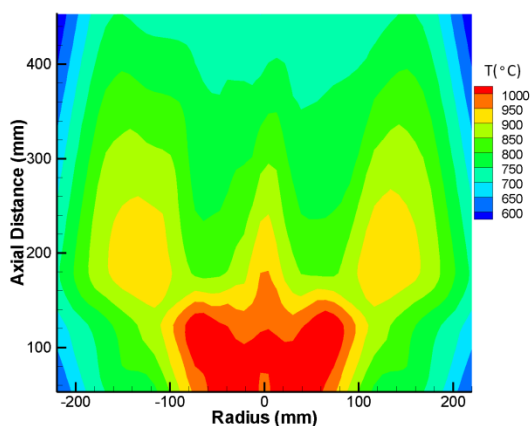
مجموعه این عوامل (کاهش دمای ماکزیمم و توزیع یکنواخت دما داخل کوره)، موجب می‌شود که تولید آلاینده NO<sub>x</sub> با کاهش نسبت هم ارزی مطابق شکل ۹ در این مشعل، کاهش چشمگیری داشته باشد. ملاحظه می‌شود که میزان غلظت آلاینده اکسید ازت تحت تاثیر فاصله پیچنده تا سر مشعل قرار نداشته، تقریباً نتایج مشابهی در دو حالت مختلف فاصله مجرای خروجی مشعل حاصل شده است؛ همچنین در تحقیق مشابهی چنگ [۱۹]، میزان آلاینده اکسید ازت را در یک مشعل کم‌پیش‌در با عدد پیش‌در ۰/۵۵ و سوخت متان، مورد آزمون قرار داده که نتایج تحقیق مذکور نیز در شکل ۹ نشان داده است. ملاحظه می‌شود با رقیق شدن سوخت، میزان اکسید ازت کاهش پیدا کرده به نحوی که در تمام چهار حالت ارائه شده در نمودار و برای نسبت‌های هم ارزی کمتر از ۰/۷، مقدار اکسید ازت تولید شده کمتر از 10ppm بوده است.

مطابق نتایج به‌دست آمده، در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت بی بعد فاصله درنگ (L/R)، مشعل در بازه بیشتری از نسبت‌های هم ارزی در حالت برخاسته قرار می‌گیرد. به نحوی که اگر این طول  $2.5R \leq L$  باشد، آنگاه تقریباً برای تمامی نسبت های هم ارزی کمتر از ۱، شعله برخاسته خواهد بود و لذا از عملکرد شعله، اطمینان بیشتری وجود خواهد داشت. از طرفی تغییر طول مجرای خروجی (فاصله

افزایش داده و رژیم شعله و توزیع دمای داخل محفظه احتراق متفاوت شده است.



شکل ۱۳- توزیع دما در فاصله  $L=2R$  و  $\phi = 0.78$

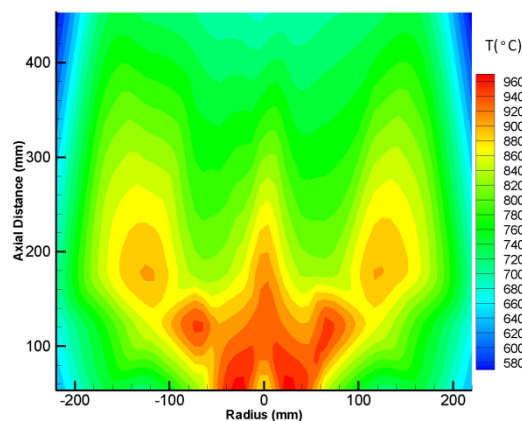


شکل ۱۴- توزیع دما در فاصله  $L=3R$  و  $\phi = 0.78$

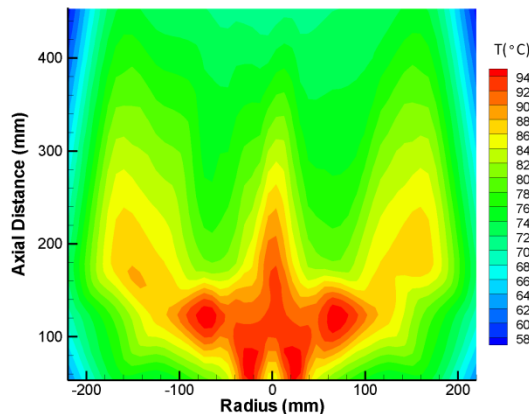
همچنین در مقایسه شکل ۱۱ (شعله برخاسته) و شکل ۱۳ (شعله چسبیده)، رژیم توزیع محصولات احتراق داغ در مشعل پیچشی برخاسته، بسیار متفاوت از شعله در حالت چسبیده به مشعل است (توزیع همگون دما در ابتدای محفظه رخ می‌دهد، لذا می‌توان با استفاده از مشعل‌های کم پیچش، نسبت به طراحی محفظه‌های احتراقی با ابعاد کوچک‌تر نیز اقدام کرد.

همان‌طور که نتایج ارائه شده در این مقاله نشان می‌دهد، تغییر فاصله درنگ در شکل شعله و محل قرارگیری آن با ثابت بودن سایر پارامترها و مشخصات مشعل، تاثیر مستقیم داشته است. افزایش این فاصله، موجب کاهش نرخ پیچش و استهلاك آن شده، موجب می‌شود سرعت محوری در

Matlab و روش درونیایی Triangle cubic interpolation، کانتورهای زیر به دست آمده است.



شکل ۱۱- توزیع دما در فاصله  $L=2R$  و  $\phi = 0.68$



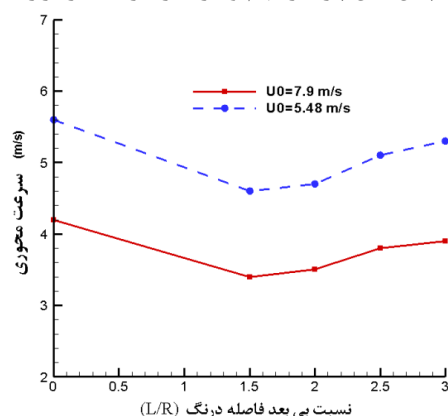
شکل ۱۲- توزیع دما در فاصله  $L=3R$  و  $\phi = 0.68$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در مقایسه شکل ۱۱ با شکل ۱۲ با ثابت نگه داشتن سایر شرایط و افزایش فاصله درنگ در یک نسبت هم ارزی ثابت، توزیع دما کمی پخش‌تر و شعله واگراتر شده است. در واقع با افزایش میزان فاصله درنگ، نسبت اندازه بردارهای سرعت محوری به اندازه بردارهای سرعت شعاعی در دهانه خروجی مشعل با ثابت بودن سرعت اولیه مخلوط سوخت و هوا، افزایش یافته، لذا محل تشکیل شعله بالاتر و موجب برخاستگی و پخش بیشتر شعله شده است. همچنین در مقایسه شکل ۱۱ با شکل ۱۳ و یا مقایسه شکل ۱۲ با شکل ۱۴، در فاصله درنگ ثابت، کاهش نسبت هم ارزی و رقیق شدن سوخت، میزان برخاستگی شعله را

و استفاده از نرم افزار پردازش تصاویر، مشخصات ظاهری شعله کم پیچش و تغییرات آن با نسبت هم ارزی و سرعت مخلوط سوخت، مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۶، نشان‌دهنده مقایسه شعله‌های کم پیچش در نسبت‌های هم ارزی برابر، ولی با طول مجرای خروجی متفاوت است. روند غالب در تغییر شکل شعله با افزایش فاصله درنگ مشاهده می‌شود که برخاستگی شعله و طولانی‌تر شدن طول شعله است.

همان‌طور که در شکل ۱۶ و حالت  $L=2R$  و  $L=1.5R$  ملاحظه می‌شود، شعله به دهانه مشعل چسبیده است. به دلیل اینکه در حالت  $1.5R$  و  $2R$ ، فاصله پیچنده تا دهانه نسبتاً کم است، لذا جریان خروجی از مشعل دارای پیچش قابل توجهی بوده، عدد پیچش بالا منجر به چسبیدن شعله با ثابت بودن سایر شرایط و مشخصات مشعل شده است. همین امر سبب می‌شود که جریان در خروجی با واگرایی قابل توجهی روبرو شود و سرعت موضعی جریان در خروجی کاهش شدیدی یابد؛ در حالتی که فاصله درنگ افزایش یافته ( $L=2.5R$  و  $L=3R$ ) رژیم متفاوتی از شعله به وجود می‌آید که شعله برخاسته است. در این حالت، شعله شکل کاسه ماندنی دارد. این شعله به دلیل عدم تماس با سرمشعل، دارای ویژگی منحصر به فردی از نظر کاربردی است. اصلی‌ترین دلیل برای برخاسته شدن شعله در این دو حالت، فاصله بیشتر پیچنده نسبت به سرمشعل است. این فاصله بیشتر ( $2.5R$  و  $3R$ ) موجب می‌شود، مدت زمان ماندگاری مخلوط داخل مشعل بیشتر شده، در نتیجه جریان پیچشی اطراف با جریان مرکزی بیشتر مخلوط شده و بخشی از پیچش جریان مستهلک و ممنتوم زاویه‌ای کاهش یافته و جریان خروجی دارای پیچش کمتر و در نتیجه واگرایی کمتر باشد. واگرایی کمتر به این معنی است که سرعت جریان محوری بیشتر شده، لذا مکان تشکیل شعله از سر مشعل بالاتر می‌رود.

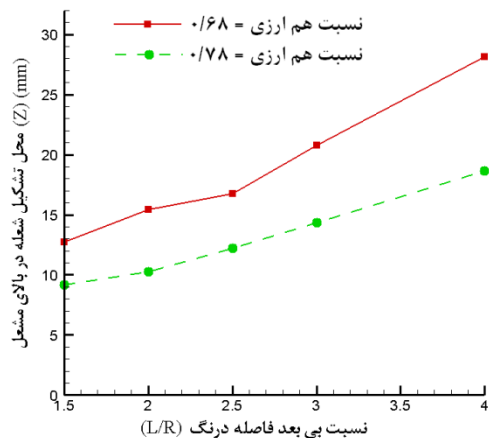
خروجی افزایش یابد. بدین ترتیب محل برابری سرعت شعله آشفته و سرعت مخلوط سوخت و هوا به نقطه‌ای پایین دست سر مشعل منتقل شده، شعله برخاسته تر خواهد بود. برای اثبات این موضوع با استفاده از بادسنج Testo 410-2 اندازه میانگین سرعت محوری عبوری در محلی به فاصله  $70$  میلی‌متر بالای مشعل در حالت سرد اندازه‌گیری شده، نتایج در شکل ۱۵ نشان داده شده است. برای نشان دادن تاثیر فاصله درنگ، دو سرعت اولیه متفاوت انتخاب گردیده، پیچنده از سر مشعل به صورت مرحله به مرحله به داخل مشعل منتقل شده است. نتایج، نشان می‌دهد که با وارد شدن پیچنده به داخل مشعل، ابتدا جریان محوری کاهش یافته، سپس با افزایش بیشتر این طول و به وجود آمدن فرصت برای اختلاط جریان پیچشی اطراف با جریان محوری عبوری از صفحه مشبک، سرعت محوری دوباره افزایش یافته است. این موضوع، نشان می‌دهد که پارامتر هندسی فاصله درنگ به طور مستقیم در میزان پیچش در سر مشعل اثر گذار بوده، لازم است در طراحی مشعل‌های کم پیچش به جز عدد پیچش، این پارامتر مهم و اثرگذار نیز مدنظر قرار گیرد.



شکل ۱۵- اندازه سرعت محوری در پایین دست مشعل در حالت سرد و با تغییر میزان فاصله درنگ

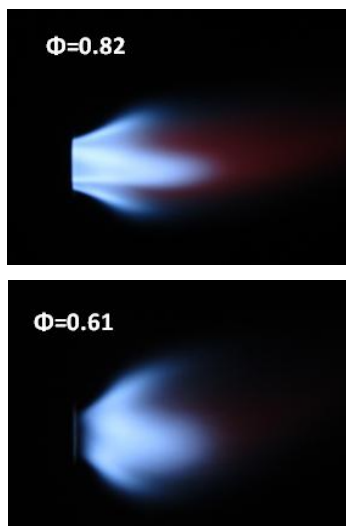
محل تشکیل شعله، تابعی است از سرعت شعله آشفته و سرعت مخلوط سوخت و هوا، لذا مطابق شکل ۱۵ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با افزایش فاصله درنگ و در نتیجه افزایش سرعت جریان محوری در پایین دست مشعل، ارتفاع محل تشکیل شعله از سر مشعل بیشتر شده، شعله برخاسته‌تری به وجود خواهد آمد. به منظور اطمینان از این تحلیل و برای توصیف بهتر موضوع، با تصویر برداری از شعله

<sup>1</sup> Bowl-shaped

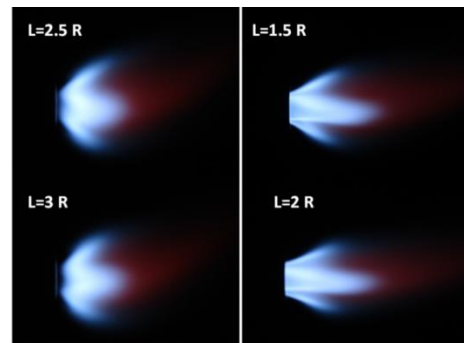


شکل ۱۸- تغییرات اندازه برخاستگی شعله با تغییر نسبت هم ارزی و فاصله درنگ

از نمودار ۱۸ نتیجه‌گیری می‌شود که شکل شعله در مشعل کم پیچش (LSB)، علاوه بر فاصله درنگ به طور مشخص از نسبت هم ارزی سوخت و هوا تاثیر می‌پذیرد. این موضوع در تصاویر تهیه شده از شعله در شکل ۱۹ به طور واضح نمایان است. با کاهش نسبت هم ارزی و رقیق شدن مخلوط، به تدریج از سرعت شعله کاسته شده، مشعل مطابق شکل ۱۹ از حالت چسبیده، به حالت برخاسته تغییر ماهیت می‌دهد. تغییر حالت شعله در نحوه توزیع و گردش محصولات احتراق و به تبع آن نحوه توزیع دما داخل محفظه احتراق و اطراف مشعل اثر گذار خواهد بود.

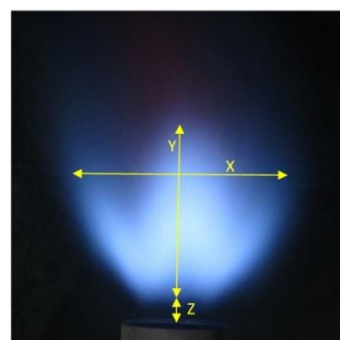


شکل ۱۹- تاثیر تغییر نسبت هم ارزی بر تغییر رژیم شعله با ثابت نگه داشتن سایر مشخصات مشعل



شکل ۱۶- تغییرات هندسه شعله با تغییر فاصله درنگ در نسبت هم ارزی برابر با ۰/۸۵

برای یک شعله کم پیچش مطابق شکل ۱۷، سه پارامتر هندسی قابل اندازه‌گیری است؛ لذا با عکس برداری از شعله و استفاده از سیستم پردازش تصاویر در این تحقیق، میزان برخاستگی شعله (Z) اندازه‌گیری و نتایج در شکل ۱۸ نشان داده شده است. مطابق شکل با افزایش فاصله درنگ، به دلیل افزایش سرعت جریان محوری در خروجی مشعل، در یک نسبت هم ارزی ثابت، محل برابری سرعت شعله و سرعت مخلوط به پایین دست منتقل و میزان ارتفاع برخاستگی افزایش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود که در یک فاصله درنگ و طول مجرای خروجی ثابت، با کاهش نسبت هم ارزی و رقیق شدن مخلوط میزان برخاستگی بیشتر شده است. این موضوع، به این دلیل رخ داده که با رقیق شدن مخلوط، سرعت شعله آشفته کاهش یافته، لذا در نقطه دورتری از مشعل شرط برابری سرعت محقق شده است.



شکل ۱۷- تصویر شعله برخاسته مشعل کم پیچش و پارامترهای قابل اندازه‌گیری

## ۴ - نتیجه‌گیری

با توجه به نمودارهای ارائه شده در بخش قبل، نتایج زیر از این داده‌ها و نمودارها نتیجه‌گیری می‌شود:

۱- فاصله درنگ یا فاصله پیچنده از سرمشعل تاثیر مستقیم و مشخصی در عملکرد مشعل داشته و با افزایش این طول، سرعت جریان محوری تغییر کرده، بر میزان پیچش موثر نیز اثر گذار خواهد بود.

۲- در عدد بی‌بعد ارائه شده برای فرموله کردن عدد پیچش کلیه پارامترهای هندسی مشعل، به جز فاصله درنگ منظور شده است؛ لیکن همان‌طور که از نمودارهای ارائه شده مشخص می‌شود، افزایش فاصله پیچنده از سرمشعل موجب تغییر در کمیت بردارهای شعاعی و محوری خروجی از مشعل شده، لذا در محل قرارگیری و ابعاد شعله اثرگذار است. بر این اساس، نتیجه‌گیری می‌شود که افزایش فاصله درنگ علاوه بر افزایش زمان اختلاط، موجب کاهش عدد پیچش در خروجی می‌شود.

۳- عملکرد احتراق کم پیچش در حالت رقیق مناسب‌تر بوده و شعله‌ای واگرا و پخشی به‌وجود می‌آورد که موجب می‌شود، توزیع دما داخل محفظه احتراق یکنواخت‌تر شده، محصولات احتراق با دمای بالاتری در تماس بیشتر با جداره محفظه قرار گرفته و انتقال حرارت بیشتر به بدنه را منجر می‌شود.

۴- برای داشتن شعله‌ای برخاسته در تمامی نسبت‌های هم ارزی لازم است همواره در طراحی مشعل‌های پیچشی  $L > 2R$  باشد.

۵- تولید  $NO_x$  در مشعل‌های کم پیچش تابع فاصله درنگ نبوده، با ظرفیت مشعل نیز تغییر چندانی نمی‌کند و لذا همواره مقادیر تولید  $NO_x$  بسیار پایین بوده، این مشعل‌ها را می‌توان جزو گروه مشعل‌های  $Low NO_x$  دسته‌بندی کرد.

۶- با توجه به رژیم شعله‌ای برخاسته احتراق کم پیچش و پروفیل‌های دمایی به دست آمده در این تحقیق و از طرفی نرخ بسیار پایین آلاینده‌ی این مشعل و ویژگی‌های پایداری آن حتی در وضعیت‌های رقیق مخلوط سوخت و هوا، لازم است در خصوص گسترش به‌کارگیری از این مشعل‌ها در صنعت نیز اقداماتی صورت پذیرد.

## ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب سپاسگزاری و قدردانی خود را از جناب آقای مهندس ایوب عادل و تمامی همکاران ارجمند ایشان در شرکت شعله صنعت که در ساخت سرمشعل‌های به‌کار گرفته شده در این تحقیق، ما را یاری کرده‌اند و نیز شرکت گاز استان خراسان رضوی به عنوان حامی مالی طرح ابراز - می‌دارند.

## ۶ - مراجع

- [1]. Warnatz J, Mass U, and Dibble R.W, (1999) Combustion, physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation, Second edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- [2]. Bluestein J, (1992)  $NO_x$  controls for gas fired industrial boilers and combustion equipment: a survey of current practices, Technical Report GRI-92/0374, Gas Research Institute.
- [3]. Rokke N.A, Experimental and theoretical studies of environmental aspects of natural gas combustion, PhD thesis, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, ISBN: 82-7119-702-9.
- [4]. Wunning JA, Wunning JG, (1997) Flameless oxidation to reduce thermal  $NO$  formation. Progress in Energy Combustion Science, 23: 81-94.
- [5]. Cheng R.K, Yegian D.T, Miyasato M.M, Samuelen G.S, Benson C.E, Pellizzari R, and Loftus P, (2000) Scaling and development of low swirl burners for low emission furnaces and boilers, Proceedings of the Combustion Institute, 28: 1305-1313
- [6]. Syred N, Beer J.M, (1974) Combustion in swirling flows: a review, Combustion and Flame, 23:143-201.
- [7]. Yegian D.T, Cheng R.K, (1998) Development of a lean premixed low-swirl burner for low  $NO_x$  practical applications, Combustion Science and Technology, 139:207-227
- [8]. Johnson M.R, Littlejohn D, Nazeer W.A, Smith K.O, and Cheng R.K, (2005) A comparison of the flowfields and emissions of High-Swirl Injectors and Low-Swirl Injectors for lean premixed gas turbines, Proceedings of the Combustion Institute, 30:2867-2874
- [9]. Cheng R.K, Littlejohn D, Noble D, Lieuwen T, (2010) Laboratory Investigations of Low-Swirl Injectors Operating with Syngases, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 132: 011502-1-8
- [10]. Cheng R.K, (1995) Lean premixed combustion stabilized by low swirl, A promising concept for

- practical applications, *Combustion and Flame*, 101: 1-18
- [11]. Cheng R.K, (1995) Velocity and scalar characteristics of premixed turbulent flames stabilized by weak swirl, *Combustion and Flame*, 101:1-14.
- [12]. Cheng R.K, and Littlejohn D, (2008) Effects of combustor geometry on the flowfields and flame properties of a low-swirl injector, *Proceedings of Gas Turbine, ASME Turbo Expo, Berlin, Germany*.
- [13]. Cheng R.K, and Littlejohn D, Nazeer W.A and Smith K.O, (2006) Laboratory studies of the flow field characteristics of low swirl injectors for adaptation to fuel flexible turbines, *Proceedings of Gas Turbine, ASME Turbo Expo, Barcelona, Spain*
- [14]. Sequera D and Agrawal A, (2007) Emissions and acoustics measurements in a Low-Swirl Burner, 45<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada.
- [15]. Legrand M, Nogueira J, Lecuona A, Nauri S, and Rodriguez P, (2010) Atmospheric Low Swirl Burner Flow Characterization with Stereo PIV, *Experiments in fluids*, 48: 901-913.
- [16]. Emadi M, Karkow D, Salameh T, Gohil A, Ratner A, (2012) Flame structure changes resulting from hydrogen-enrichment and pressurization for low-swirl premixed methane air flames, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37:10397-10404
- [17]. Beerer D, McDonnell V, Therkelsen P, Cheng R.K, (2013) Flashback and turbulent flame speed measurements in a Hydrogen and Methane fired Low-Swirl Injector at elevated pressures and temperatures," 8<sup>th</sup> U.S.National Combustion Meeting, hosted by the Univ of Utah, May 19-22.
- [18]. Ballachey G.E, Johnson M.R, (2013) Prediction of blowoff in a fully controllable low-swirl burner burning alternative fuels: Effects of burner geometry, swirl, and fuel composition, *Proceedings of the Combustion Institute*, 34: 3193-3201
- [19]. Cheng R.K, (2004) Low-swirl flame stabilization method for lean premixed turbulent flames and its adaptation to heating and power equipment," *Presentation at ABMA Mid-Winter Conference, Jan18*.