

# بررسی تجربی و ارزیابی عملکرد مشعل‌های سرعت بالا با هدف کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن

نجمه حاجی‌علی‌گل\* استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران، n.hajialigol@hut.ac.ir

## چکیده

این تحقیق به بررسی و مطالعه تجربی یک نمونه مشعل پیش‌آمیخته با سرعت بالا می‌پردازد. به منظور به‌کارگیری صحیح این نوع مشعل لازم است که ویژگی‌های عملکردی آن بدرستی بررسی شود. سرعت خروجی محصولات احتراق از دهانه این مشعل‌ها بین ۷۰ تا ۲۰۰ متر بر ثانیه است که این سرعت سیال، مانع از ایستایی محصولات احتراق در کوره می‌گردد. بررسی تجربی شامل اندازه‌گیری طول شعله، بدست آوردن میدان دما و بررسی محدوده پایداری می‌شود. میدان دما به کمک ۸ عدد ترموکوپل که در موقعیت‌های مختلف قرار گرفته‌اند اندازه‌گیری می‌شود. تغییرات دما در دو نسبت هم‌ارزی ۰/۹۶ و ۱/۰۵ به ازای نسبت‌های طولی و شعاعی مختلف، تاثیر بارهای مختلف بر طول شعله و تغییرات حد پایداری با قدرت مشعل در قالب نمودارهایی به نمایش درآمده است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که دمای محور مرکزی با افزایش فاصله محوری و شعاعی از سر مشعل، دچار تغییر می‌شود و طول شعله به ازای دی‌های ورودی مختلف، به آرامی تغییر می‌کند. در بررسی نسبت هم‌ارزی ملاحظه شد که در نسبت هم‌ارزی ۰/۹۶ در مقایسه با نسبت هم‌ارزی ۱/۴ به ازای مقدار برابر گاز مصرفی، تغییرات دما یکنواخت‌تر است و تمرکز گرما کمتری روی دیوار حاصل می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** مشعل پیش‌آمیخته، کاهش نیتروژن، احتراق پیش‌آمیخته، پارامترهای احتراقی، بررسی تجربی، اثرات زیست محیطی.

## Experimental investigation and performance evaluation of high-velocity burners to reduce nitrogen oxide emissions

N. Hajialigol

Mechanical Engineering Department, Hamedan University of Technology, 65155-579 Hamedan, Iran.

## Abstract

This research investigates and experimentally studies a high-speed premix burner. To use this type of burner correctly, it is necessary to properly examine its performance characteristics. The exit velocity of the combustion products from the mouth of these burners is between 70 and 200 m/s, which prevents the combustion products from stagnating in the furnace. The experimental investigation includes measuring the flame length, obtaining the temperature field, and examining the stability range. The temperature field is calculated with the help of eight thermocouples placed in different positions. Temperature changes in two equivalence ratios of 0.96 and 1.05 for different longitudinal and radial ratios, the effect of various loads on the flame length, and changes in the stability limit with the burner power are displayed in graphs. This study's results show that the central axis's temperature changes with increasing axial and radial distance from the burner head, and the flame length changes slowly for different inlet flow rates. In examining the equivalence ratio, it was observed that at an equivalence ratio of 0.96, compared to an equivalence ratio of 1.4 for the same amount of gas consumed, the temperature changes are more uniform and less heat is concentrated on the wall.

**Keywords:** High velocity premixed burner, NOx emissions, Combustion parameters, Experimental investigation, Environmental impacts.

## ۱- مقدمه

بدلیل نقش مهم مشعل‌های صنعتی در تولید گرما و قدرت بعنوان یکی از بزرگترین مصرف‌کننده‌های سوخت‌های فسیلی، تلاش‌های بسیاری برای بهبود کارایی این تجهیزات صورت گرفته‌است. طراحی مشعل‌های صنعتی جنبه‌های متفاوتی دارد که می‌توان به کاهش مصرف سوخت، کنترل آلاینده‌ها و پایداری عملکرد آن‌ها اشاره کرد. این تحقیق به بررسی مشعل پیش‌آمیخته سرعت بالا بعنوان یکی از فناوری‌های جدید مشعل‌سازی می‌پردازد. کاربرد عمده این مشعل در کوره‌های عملیات گرمایی و کوره‌های شاتل است و استفاده از آن روز بروز در حال افزایش است.

با وجود پیشرفت‌های زیاد در شبیه‌سازی‌های عددی، آزمون مشعل همچنان نقش کلیدی در بهبود مشعل‌ها بازی می‌کند. آزمایش‌ها برای طراحی مشعل‌های جدید مورد نیاز هستند و اهدافشان شامل تعیین محدوده عملکرد، خصوصیت و طول شعله، اندازه‌گیری میزان آلاینده‌ها و غیره است. داده‌های تجربی فقط برای سازندگان مشعل‌ها بالارزش

نسبتند بلکه برای بهبود عملکرد نیز مناسبند [۱]. لوئیس و همکارانش [۲] به مطالعه تجربی برگشت شعله در مشعل بنسن پرداختند. ایشان به طور تجربی نشان دادند که برگشت شعله در قسمت دیواره مشعل از سایر نواحی مشعل بیشتر است. استفاده از مشعل‌های کم‌پیش‌ یک روش کاهش اکسیدهای نیتروژن و افزایش پایداری احتراق می‌باشد که توسط چنگ و همکارانش [۳] ابداع شده است. اساس عملکرد مشعل کم‌پیش تولید شعله معلق با استفاده از جریان واگرایی ایجاد شده در خروجی آن بوده بطوریکه سرعت آشفته شعله پیش‌مخلوط با سرعت جریان محلی برابر شود. به علت این‌که سرعت آشفته شعله از سرعت جریان خروجی از گلوگاه مشعل کمتر است، شعله در این مشعل پس زده نمی‌شود.

در جهت بهبود بازده مشعل‌ها مطالعه و بررسی وسیعی صورت گرفته است و اغلب بررسی‌ها به جت جریان متحدالمرکز منجر شده است. در چنین آرایشی یک نگهدارنده شعله، به منظور تولید منطقه بازگردش نیاز است که باعث می‌شود جریان سوخت و هوا کاملاً مخلوط

\* نویسنده‌گان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: n.hajialigol@hut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۰۷/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱

شوند و واکنش دهند. بوی و همکارش [۴] اثر قطر و مکان جسم پایدارکننده شعله را در یک مشعل پیش‌آمیخته گازسوز بررسی کردند. نتایج حاصل از کار ایشان نشان داد که بیشترین دمای شعله زمانی حاصل می‌شود که پایدار کننده در نزدیکی سر شعله قرار گرفته باشد.

تأثیر شدت آشفته‌گی بر روی توزیع سرعت در یک مشعل صلیبی شکل پیش‌آمیخته توسط شای و همکارانش [۵] به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که افزایش شدت آشفته‌گی، نرخ سوزش را بالا می‌برد و با کوتاه شدن طول شعله، بیشینه سرعت به ورودی مشعل نزدیک‌تر می‌شود. بوی و چانیولا [۶] مشخصات نشر و توزیع دمای محوری را در مشعل پیش‌آمیخته مولد گازسوز بررسی کردند. وجود ماکزیمم توزیع دمای شعله محوری در نسبت هوا به سوخت ۱ از نتایج این تحقیق بود. همچنین توزیع دما در طول محفظه در همه حالت‌ها ابتدا با افزایش و سپس با کاهش همراه بود. لازیک و همکارانش [۷] به صورت عددی و تجربی به مطالعه کاربرد مشعل با شعله ای تخت پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از این نوع مشعل در کوره‌ها تا ۴۰٪ مصرف سوخت را کاهش می‌دهد.

وانگ و همکاران [۸] به بررسی اثرات مختلف شرایط احتراق هوا بر انتشار NOx در ترکیب زغال‌سنگ پرداختند. این مطالعات در یک کوره آزمایشی احتراق زغال‌سنگ خودپایدار یک‌بعدی انجام شد. در این پژوهش، اثرات چندمرحله‌ای هوارسانی مورد بررسی قرار گرفت که با تنظیم چندین نازل هوا در ارتفاعات مختلف کوره ممکن شده بود. نتایج حاصل نشان داد که استفاده از احتراق چندمرحله‌ای هوا می‌تواند انتشار NOx را کاهش دهد و جالب اینجاست که با به‌کارگیری سه مرحله هوارسانی، پایین‌ترین میزان انتشار NOx به دست آمد.

ما و همکاران [۹] نیز تحقیقات دقیقی در زمینه احتراق مرحله‌ای هوای زغال‌سنگ پودر شده انجام دادند. در این مطالعه، نحوه چیدمان نازل‌های OFA در ارتفاع ۱/۲۹۴ متری از مشعل بررسی شد. این پژوهش نشان داد که در بسیاری از فرآیندهای احتراق مداوم، از چرخش برای تثبیت شعله استفاده می‌شود. با ایجاد یک جریان چرخشی توسط مشعل، منطقه احتراق مرکزی به عنوان نقطه‌ای برای لنگر شعله شکل می‌گیرد [۱۰]. تحلیل شعله‌های چرخان معمولاً از طریق شبیه‌سازی‌های گردابی بزرگ ممکن می‌شود [۱۱].

در حوزه کاربردهای نیروگاهی، استفاده از مشعل‌های چرخشی همراه با احتراق مرحله‌ای هوا به منظور کاهش انتشار NOx به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. ژو و همکاران [۱۲] عملکرد احتراق زغال‌سنگ پودر شده و انتشار NOx را در یک مشعل چرخشی بررسی کردند. این پژوهش بر بهینه‌سازی انتشار NOx در یک مشعل کم‌انتشار تمرکز داشت و برای این منظور از یک سیستم هوارسانی سه‌مرحله‌ای استفاده شد. این سیستم با ایجاد یک ناحیه گردش حلقوی میان جت‌های هوای اولیه و ثانویه، احتراقی سریع‌تر و کامل‌تر را تضمین کرد. این روند به کاهش مصرف اکسیژن و ایجاد یک محیط غنی از سوخت در منطقه کاهش کمک کرد و در نتیجه، مقدار NOx تولیدی در شعله به‌طور محسوسی کاهش یافت. در نهایت، افزودن هوای اکسیدکننده OFA غلظت NOx را در خروجی محفظه احتراق به میزان چشمگیری کاهش داد.

لازم به ذکر است که تحقیقات معاصر بیشتر بر روی فرآیندهای صحنه‌سازی هوا در طول کل کوره متمرکز هستند. با این وجود،

پایاده‌سازی این روش در کوره‌های نیروگاهی با چالش‌هایی روبرو است، چرا که نیازمند تغییرات وسیعی در ساختار کوره می‌باشد که ممکن است عملی نباشد. در نتیجه، طراحی مشعل‌هایی که به‌طور همزمان برای کاهش انتشار NOx و سازگاری با کوره‌های فعلی بهینه شده باشند، ضرورتی اساسی و چالشی بزرگ است.

مشعل‌های سرعت‌بالا به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین انواع مشعل‌های صنعتی، نقشی حیاتی در بهبود فرآیندهای گرمایی ایفا می‌کنند. این مشعل‌ها با استفاده از اندازه حرکت بالای محصولات احتراق، جریان هوای یکنواختی در محفظه احتراق ایجاد کرده که منجر به توزیع بهتر دما و کاهش نقاط داغ موضعی می‌شود. یکنواختی دما نه تنها بهره‌وری انرژی را افزایش می‌دهد، بلکه موجب بهبود کیفیت محصولات نهایی نیز می‌شود، به همین دلیل این مشعل‌ها جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند. با این حال، مطالعات جامع و جداگانه‌ای درباره ویژگی‌ها و عملکرد این مشعل‌ها به‌طور گسترده انجام نشده است. برای رفع این خلا تحقیقاتی، این مطالعه به بررسی تجربی مشعل‌های سرعت‌بالا پرداخته است. در این تحقیق، از سیستمی استفاده شده که در آن مخلوط سوخت و هوا ابتدا در سیستم اختلاط با یکدیگر ترکیب شده و سپس به سمت سرمشعل هدایت می‌شوند. این فرآیند باعث بهبود کیفیت احتراق و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌شود. در این پژوهش، میدان دما در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف ارزیابی شده و تغییرات طول شعله به همراه حد پایداری آن بررسی شده است. نتایج نشان داده که طول شعله به قدرت مشعل و دبی ورودی بستگی دارد و حد پایداری مشعل نیز به نسبت‌های هم‌ارزی مرتبط است. علاوه بر این، تغییرات دما در میدان‌های مختلف نشان‌دهنده ویژگی‌های خاص عملکردی مشعل‌های سرعت‌بالا است که برای طراحی بهتر و استفاده بهینه از آن‌ها بسیار ارزشمند است. این یافته‌ها می‌توانند به عنوان مبنایی برای توسعه مشعل‌های نسل جدید با بهره‌وری بالا و کاهش آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

## ۲- مکانیزم‌های پایدارسازی مشعل

در سیستم‌های احتراق صنعتی، پایداری شعله یکی از عوامل حیاتی برای حفظ عملکرد بهینه و ایمن دستگاه‌ها به شمار می‌رود. شعله پایدار، همان‌طور که تعریف شد، به حالتی اشاره دارد که شعله در محل طراحی‌شده باقی بماند و از مشکلاتی مانند برگشت شعله، جدایش شعله، یا پریدن شعله در محدوده عملکرد جلوگیری شود. این ویژگی نه تنها به عملکرد پایدار مشعل کمک می‌کند، بلکه ایمنی و بهره‌وری سیستم را نیز تضمین می‌نماید. برای ایجاد شعله‌ای پایدار، مشعل باید تحت شرایطی کار کند که از وقوع مشکلات دینامیکی مانند برگشت یا پریدن شعله جلوگیری شود. در این حالت، سرعت شعله آشفته محلی برابر با سرعت متوسط جریان در ناحیه‌ای است که احتراق رخ می‌دهد، و این تعادل موجب چسبندگی شعله به موقعیت طراحی‌شده می‌شود. مشعل‌های صنعتی از چندین مکانیزم برای پایدارسازی شعله استفاده می‌کنند که شامل موارد زیر می‌شود:

- ۱- سوراخ‌های فرعی با سرعت‌پایین جریان سوخت و هوا: این سوراخ‌ها به توزیع بهتر سوخت و هوا کمک می‌کنند و در نتیجه شعله‌ای پایدارتر ایجاد می‌شود.

یکی از مزایای کلیدی این سیستم، قابلیت تنظیم بازه زمانی دریافت داده‌ها است که انعطاف‌پذیری و دقت بیشتری در اندازه‌گیری ایجاد می‌کند. در این مطالعه، بازه زمانی ۱ ثانیه انتخاب شده است تا داده‌های خروجی با دقت بالا ثبت شوند. به‌منظور حذف تاثیر اغتشاشات و دستیابی به دمای حالت پایدار، میدان دما در هر حالت به مدت ۱۰ دقیقه متوالی اندازه‌گیری شده و داده‌های مربوطه به طور مرتب در فایل‌های جداگانه ذخیره شده است.

پس از اتمام فرآیند اندازه‌گیری، داده‌ها به‌صورت دقیق و کامل توسط نرم‌افزار Matlab تحلیل شدند و دمای حالت پایدار محاسبه شد. از آنجا که دقت اندازه‌گیری دما در این تحقیق اهمیت بالایی داشته است، از ترموکوپل با دقت حداکثر ۳ کلوین استفاده شد، درحالی‌که خطای ثبت این داده‌ها در سیستم تنها ۱ کلوین بود. این ترکیب از فناوری‌ها و روش‌های دقیق، امکان دستیابی به نتایجی بسیار قابل اعتماد و علمی را فراهم کرده است که می‌تواند در مطالعات مشابه و فرآیندهای صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.

### ۳-۲- اندازه‌گیری طول شعله

در این تحقیق، اندازه‌گیری طول شعله با استفاده از خط‌کش فلزی انجام شد. خط‌کش به صورت مماسی در امتداد محور مشعل قرار داده شده است تا امکان اندازه‌گیری دقیق طول شعله فراهم شود. این روش ساده و کاربردی به محققین اجازه می‌دهد تا با مشاهده مستقیم و تطبیق شعله با خط‌کش، اطلاعات دقیقی از طول آن در شرایط مختلف ثبت کنند.

قرارگیری خط‌کش به نحوی طراحی شده است که بتواند بدون ایجاد اختلال در عملکرد مشعل یا جریان احتراق، به شکل ایمن و ثابت استفاده شود. موقعیت دقیق و نحوه نصب خط‌کش به‌طور کامل در شکل ۱ ارائه شده است تا شفافیت و دقت روش اندازه‌گیری تضمین شود. این روش توانست اندازه‌گیری‌های دقیق و قابل اعتمادی را ارائه دهد که می‌تواند برای تحلیل و بررسی عملکرد مشعل در مطالعات مشابه بسیار سودمند باشد.

این رویکرد همچنین امکان ارزیابی تغییرات طول شعله در شرایط مختلف عملیاتی مانند تغییر نسبت سوخت و هوا یا توان مشعل را فراهم می‌کند. این اطلاعات، پایه‌ای برای بررسی‌های جامع‌تر درباره ویژگی‌های عملکردی شعله و بهینه‌سازی فرآیند احتراق هستند.



شکل ۱- اندازه‌گیری طول شعله

### ۳-۳- اندازه‌گیری دبی

در این پژوهش، دبی حجمی سوخت و هوا با استفاده از روماتر اندازه‌گیری شد که یکی از روش‌های رایج و دقیق برای این منظور به شمار می‌رود. از آنجا که روماترهای موجود در بازار عموماً تحت شرایط استاندارد کالیبره می‌شوند، ضروری است که برای دستیابی به دبی

۲- سرمشعل فلزی یا سرامیکی: مواد مقاوم به گرما در طراحی سرمشعل به حفظ پایداری شعله و جلوگیری از آسیب در دماهای بالا کمک می‌کند.

۳- جریان چرخشی ناشی از افزایش ناگهانی سطح مقطع جریان: این جریان چرخشی نه تنها باعث تقویت پایداری شعله می‌شود بلکه به کاهش نقاط داغ موضعی نیز کمک می‌کند. پایداری شعله به عوامل متعددی مانند طراحی مشعل، سرعت جریان، نسبت سوخت و هوا، و ویژگی‌های ترمو-دینامیکی وابسته است. در نتیجه، در طراحی مشعل‌های صنعتی توجه به این پارامترها ضروری است تا عملکرد بهینه و ایمن دستگاه تضمین شود. این مفاهیم برای مهندسان و پژوهشگرانی که به دنبال بهینه‌سازی عملکرد مشعل‌ها هستند، بسیار مفید و کاربردی است.

### ۳- دستگاه آزمایش

در این مطالعه، مشعل مورد آزمایش در فضای باز و تحت شرایط طبیعی محیطی مورد بررسی قرار گرفته است. این انتخاب برای اطمینان از اجرای آزمایش در شرایطی بود که اثرات محیطی خارجی مانند جریان هوا یا دما بر عملکرد مشعل کاملاً کنترل شده باشد. پیش از آغاز فرآیند اندازه‌گیری، مشعل به مدت ۴۰ دقیقه روشن نگاه داشته شد تا دمای سطح مشعل و سرمشعل به حالت پایدار برسد. این زمان کافی به مشعل اجازه داد تا به دمایی برسد که در داده‌های اندازه‌گیری تأثیرگذار بوده و نتایج معتبر و قابل اعتمادی ارائه دهد.

برای اندازه‌گیری دقیق پارامترهای عملکردی مشعل، ابزارهای مختلفی مورد استفاده قرار گرفتند که هر یک دارای نقش خاصی در جمع‌آوری داده‌های لازم بودند. تجهیزات به‌کار گرفته شده شامل سنسورهای دما، ترموکوپل‌ها و روماترها بودند. سنسورهای دما با دقت بالا قادر به ثبت تغییرات گرمای در نواحی مختلف مشعل بوده‌اند. ترموکوپل‌ها نیز برای اندازه‌گیری میدان دما در نقاط متعدد به‌کار گرفته شدند، در حالی که روماترها جریان سوخت و هوا را با دقت اندازه‌گیری و ثبت کردند.

این آزمایش، که با جزئیات دقیق در طراحی و استفاده از ابزارهای مناسب همراه بود، داده‌های باکیفیتی را برای تحلیل عملکرد مشعل فراهم کرد. این روش‌ها و ابزارها امکان بررسی کامل پایداری عملکرد مشعل و تحلیل شرایط مختلف عملیاتی آن را فراهم نمودند.

### ۳-۱- اندازه‌گیری دما

در این تحقیق برای دستیابی به داده‌های دقیق‌تر و کاهش خطاهای احتمالی در اندازه‌گیری، از یک سیستم جامع و یکپارچه اندازه‌گیری دما استفاده شده است. این سیستم به‌گونه‌ای طراحی شده که نتایج اندازه‌گیری‌ها به‌صورت خودکار در قالب فایل‌های اطلاعاتی در رایانه ذخیره شوند. به منظور دیجیتالی کردن داده‌های اندازه‌گیری شده، از سنسور ترموکوپل همراه با یک تبدیل‌کننده داده استفاده شده است که امکان دریافت سیگنال‌های آنالوگ و تبدیل آن‌ها به سیگنال‌های دیجیتال را فراهم می‌کند. خروجی تبدیل‌کننده مستقیماً توسط نرم‌افزار تخصصی پردازش شده و به‌صورت فایل در سیستم ذخیره می‌شود.

حجمی واقعی و دقیق، ضرایب تصحیح مناسب اعمال گردد. این ضرایب تصحیح بر اساس نسبتی از شرایط دمایی، فشار و چگالی سیال مورد آزمایش نسبت به سیالی که در فرآیند کالیبره‌سازی روماتر به کار گرفته شده است، محاسبه می‌شود.

فرآیند اصلاح داده‌ها با استفاده از ضرایب تصحیح، به محققین این امکان را می‌دهد که اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری‌ها را با شرایط واقعی سیستم تطبیق دهند. این امر به‌ویژه در کاربردهایی که نیاز به دقت بالا دارند، مانند مطالعات مهندسی احتراق یا فرآیندهای صنعتی حساس، بسیار حیاتی است.

در این تحقیق، روماترها با دقت  $\pm 1$  درصد مقیاس کامل مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این میزان دقت به اندازه کافی برای اطمینان از صحت و قابل اعتماد بودن نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها مناسب است. به علاوه، این روش یک راهکار عملی و مقرون‌به‌صرفه برای اندازه‌گیری جریان در شرایط مختلف عملیاتی فراهم می‌آورد.

این دقت بالا و استفاده از ضرایب تصحیح، امکان بهبود تحلیل داده‌ها و طراحی بهتر سیستم‌های احتراقی را فراهم می‌کند. داده‌های دقیق‌تر نه تنها به بررسی‌های علمی اعتبار می‌بخشند، بلکه کاربردهای عملی گسترده‌تری نیز دارند.

#### ۴- نتایج

در این پژوهش، با استفاده از ابزارهای پیشرفته اندازه‌گیری، میدان دمایی شعله ایجاد شده در فضای آزاد جلوی مشعل به دقت مورد بررسی قرار گرفته است. این اندازه‌گیری‌ها در موقعیت‌های شعاعی و طولی مختلف انجام شده تا به درک بهتری از توزیع دما در نقاط گوناگون شعله دست یابیم. علاوه بر این، نسبت‌های هم‌ارزی متفاوتی نیز مد نظر قرار گرفتند تا تأثیر این پارامتر مهم بر میدان دمایی و طول شعله بررسی شود. طول شعله متناظر با این شرایط نیز برای هر حالت به‌دقت ثبت و تحلیل شده است.

در ادامه، تغییرات طول شعله و محدوده پایداری آن به عنوان دو فاکتور اساسی عملکرد مشعل، با تغییر در قدرت مشعل مورد مطالعه قرار گرفتند. تحلیل این تغییرات می‌تواند اطلاعاتی ارزشمند در زمینه کنترل و بهینه‌سازی عملکرد مشعل فراهم آورد. برای مثال، مشاهده شد که افزایش قدرت مشعل می‌تواند به تغییراتی تدریجی در طول شعله منجر شود، در حالی که پایداری شعله نیز تحت تأثیر شرایط عملیاتی قرار می‌گیرد.

این داده‌ها در نهایت به ارائه نتایج دقیق و علمی منجر شده‌اند که در قالب نمودارها و جداول مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. این اطلاعات نه تنها به روشن‌تر شدن عملکرد مشعل تحت شرایط مختلف کمک می‌کنند، بلکه مبنای مفیدی برای طراحی و بهبود مشعل‌های نسل جدید به شمار می‌روند.

#### ۴-۱- میدان دما

در این تحقیق، به‌منظور ارزیابی تأثیر نسبت‌های هم‌ارزی مختلف بر میدان دما و رفتار شعله، دبی هوا در مقدار ثابت ۸۰ مترمکعب بر ساعت نگه داشته شده و دبی سوخت تغییر داده شده است. این روش

به محققان اجازه داد تا شرایط احتراقی را در دو نسبت هم‌ارزی متفاوت (۰/۹۶ و ۱/۰۵) که در محدوده شرایط کارکرد مشعل قرار دارند، به‌دقت بررسی کنند. نتایج به‌دست‌آمده به‌صورت نمودارهایی ارائه شده که تغییرات دمایی در نقاط مختلف شعله را به نمایش می‌گذارند.

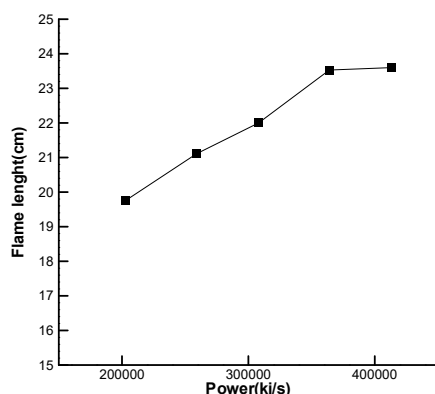
نسبت هم‌ارزی ۰/۹۶: شکل ۲-الف نشان می‌دهد که در فاصله‌های نزدیک به سرمشعل، دمای محور مرکزی به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد. این افزایش ناگهانی دما به دلیل رخ دادن احتراق سریع و آزادسازی شدید انرژی گرمایی در ناحیه اولیه شعله است. شیب تند این نمودار، افزایش شدید دما در این ناحیه را نشان می‌دهد. با پیشروی در امتداد محور مشعل و افزایش فاصله محوری، شکل ۲-ب نشان می‌دهد که دمای محور مرکزی به دلیل احتراق کامل‌تر افزایش بیشتری می‌یابد. در همین حال، شیب نمودار کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده نفوذ تدریجی گرما و کاهش تفاوت‌های دمایی در نقاط مختلف است. حداکثر دما در این حالت در فاصله محوری  $x/D=5.5$  م مشاهده می‌شود. پس از این نقطه، دمای محور مرکزی شروع به کاهش می‌کند، اما همچنان تغییرات شیب نمودار ملایم‌تر می‌شود. شکل ۲-پ تأیید می‌کند که در نواحی دورتر از سرمشعل، اختلاف دمای نقاط مجاور کمتر شده و شیب تغییرات دما یکنواخت‌تر می‌شود. این یکنواختی نشان‌دهنده انتقال بهتر گرما در میدان دمایی شعله است.

نسبت هم‌ارزی ۱/۰۵: در این حالت، روند کلی تغییرات مشابه با نسبت هم‌ارزی ۰/۹۶ است، اما تفاوت‌هایی در نواحی ابتدایی و انتهایی میدان دمایی مشاهده می‌شود. طبق شکل ۳-الف، در نواحی نزدیک به سرمشعل ( $x/D=2$ )، دما نسبت به نسبت هم‌ارزی ۰/۹۶ افزایش بیشتری دارد. این افزایش دما احتمالاً به دلیل غنی بودن سوخت و افزایش میزان آزادسازی انرژی در این ناحیه است. با افزایش فاصله محوری، همانند حالت قبل، شیب نمودار کاهش می‌یابد. با این حال، شکل ۳-پ نشان می‌دهد که در فاصله شعاعی  $r/D=3$ ، دما مجدداً افزایش می‌یابد. این افزایش دما احتمالاً ناشی از ورود گازهای سوخته از نواحی ابتدایی شعله به نواحی شعاعی انتهایی است. این رفتار در نسبت هم‌ارزی ۰/۹۶ مشاهده نشده است که نشان‌دهنده توزیع یکنواخت‌تر دما در حالت هوای غنی‌تر است.

در هر دو نسبت هم‌ارزی، بیشترین دما بر روی محور مرکزی شعله مشاهده می‌شود و با افزایش فاصله شعاعی از مرکز، مقدار دما به‌تدریج کاهش می‌یابد. همچنین، در هر دو حالت، حداکثر دما در فاصله محوری  $x/D=5.5$  اتفاق می‌افتد و پس از آن، دمای محور مرکزی با افزایش فاصله از سرمشعل کاهش می‌یابد.

این نتایج تأکید می‌کنند که تغییر نسبت هم‌ارزی می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر میدان دمایی و رفتار گرمای شعله داشته باشد. در نسبت هم‌ارزی ۰/۹۶، میدان دما یکنواخت‌تر و تغییرات تدریجی‌تر است، در حالی که در نسبت هم‌ارزی ۱/۰۵، نواحی با دمای بالاتر و تغییرات بیشتری در میدان دما مشاهده می‌شود. این اطلاعات می‌توانند در بهینه‌سازی عملکرد مشعل و کاهش نقاط داغ موضعی به‌ویژه در کاربردهای صنعتی بسیار مفید باشند.

محفظه‌های احتراق کمک کند تا عملکرد سیستم به حداکثر کارایی برسد و خطرات مرتبط با خوردگی و دما به حداقل کاهش یابد.



شکل ۴- تغییرات طول شعله با قدرت مشعل

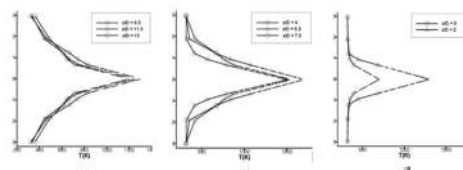
### ۳-۳-۴- پایداری شعله

حد پایداری شعله یکی از مهم‌ترین فاکتورها در طراحی و بهره‌برداری از مشعل‌های صنعتی به شمار می‌آید. این موضوع از اهمیت ویژه‌ای در صنایع برخوردار است که توقف عملکرد کوره‌ها هزینه‌های زیادی در پی دارد. در فرآیندهای صنعتی، زمانی که کوره از بهره‌برداری خارج می‌شود، خاموش کردن کامل مشعل‌ها به دلیل زمان‌بر بودن و هزینه‌های بالای بازگشت به دمای بهره‌برداری به‌صرفه نیست. در چنین شرایطی، توان مشعل کاهش می‌یابد (با کاهش دبی سوخت) تا دمای کوره در محدوده‌ای حفظ شود که کاملاً سرد نشود و بازگشت به دمای بهره‌برداری با حداقل زمان و هزینه امکان‌پذیر باشد.

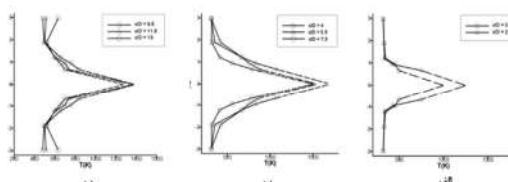
در این مطالعه، حد پایداری مشعل سرعت‌بالا در توان‌های مختلف بررسی شده است. بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل، حد پایداری شعله تقریباً مستقل از توان مشعل است و بیشتر به نسبت هم‌آرزی مخلوط وابسته است. به طور خاص، حد پایداری این مشعل در نسبت هم‌آرزی حدود ۰/۸ قرار دارد. این نشان می‌دهد که در این نوع مشعل‌ها، پایداری شعله تحت تأثیر عوامل دینامیکی مانند سرعت مخلوط ورودی نیست، بلکه تابع ویژگی‌های ترمودینامیکی نظیر نسبت هم‌آرزی است.

مشعل مورد بررسی دارای مکانیزم‌های مختلفی برای پایداری‌سازی شعله است. یکی از این مکانیزم‌ها، استفاده از افزایش ناگهانی سطح مقطع جریان در ناحیه سرمشعل برای ایجاد جریان‌های گردابی است. این مکانیزم در دبی‌های بالاتر کارایی بهتری دارد، زیرا جریان‌های گردابی قوی‌تری ایجاد شده و شعله به شکل مؤثرتری پایدار می‌ماند. با کاهش دبی مخلوط، عملکرد این مکانیزم تضعیف شده و توانایی پایداری‌سازی کاهش می‌یابد. با این وجود، باید توجه داشت که طراحی این مشعل به‌طور خاص برای عملکرد در دبی‌های بالاتر و ایجاد گرمادهی حداکثری بهینه شده است. لذا کارکرد در دبی‌های پایین هدف اصلی طراحی مشعل نیست.

بر اساس داده‌های موجود، بهترین حد پایداری (کوچک‌ترین نسبت هم‌آرزی) در توان ۲۲۰ کیلووات حاصل می‌شود. این توان نشان‌دهنده نقطه‌ای است که در آن مشعل به بهترین شکل عملکرد پایداری خود را حفظ می‌کند. در انتهای نمودار، تغییر محسوسی در حد پایداری



شکل ۲- نمودار تغییرات دما در نسبت هم‌آرزی ۰/۹۶



شکل ۳- نمودار تغییرات دما در مکانهای مختلف در نسبت هم‌آرزی

۱/۰۵

### ۲-۲-۴- طول شعله

طول شعله یکی از پارامترهای کلیدی در ارزیابی عملکرد مشعل‌ها به شمار می‌آید و تأثیر مستقیمی بر طراحی و عملکرد محفظه‌های احتراق و کوره‌ها دارد. تعیین دقیق بازه تغییرات طول شعله در شرایط مختلف عملیاتی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا این اطلاعات به طراحی بهینه محفظه احتراق کمک می‌کند و از بروز مشکلاتی همچون برخورد شعله با دیواره‌های محفظه جلوگیری می‌کند. برخورد شعله با دیواره می‌تواند منجر به افزایش دما، آسیب ساختاری و در نهایت خوردگی محفظه شود که عمر مفید تجهیزات را کاهش می‌دهد و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را افزایش می‌دهد.

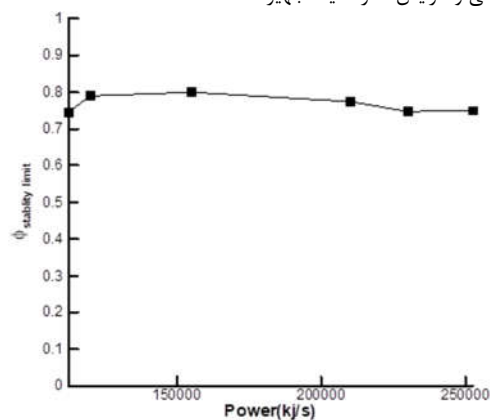
در این مطالعه، تغییرات طول شعله در نسبت هم‌آرزی ۰/۹۶ مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در شکل ۴ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش بار مشعل (افزایش دبی‌های ورودی سوخت)، طول شعله به طور پیوسته افزایش می‌یابد. این تغییر به دلیل افزایش میزان سوخت در فرآیند احتراق است که انرژی بیشتری را آزاد کرده و موجب گسترش شعله در امتداد محور مشعل می‌شود. این افزایش طول شعله می‌تواند بر جریان گرما در محفظه احتراق تأثیر بگذارد و طراحی محفظه باید به گونه‌ای باشد که طول شعله در محدوده‌ای ایمن نگه داشته شود.

طراحی محفظه‌های احتراق، توجه به طول شعله اهمیت حیاتی دارد. طول شعله باید به گونه‌ای باشد که از برخورد آن با دیواره‌های محفظه جلوگیری شود، زیرا این تماس می‌تواند به تشکیل نقاط داغ و افزایش احتمال خوردگی گرمای منجر شود. همچنین، طول شعله تأثیر مستقیمی بر بازده انتقال گرما دارد و می‌تواند بر کیفیت و کارایی فرآیندهای صنعتی اثر بگذارد.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که طول شعله تابعی از پارامترهای مختلفی مانند بار مشعل، دبی سوخت و نسبت هم‌آرزی است و این پارامترها باید به دقت در مراحل طراحی و بهره‌برداری تنظیم شوند. تحلیل تغییرات طول شعله می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی مشعل‌ها و

مشاهده نمی‌شود که نشان می‌دهد سرعت شعله آشفته و سرعت جریان به صورت همگام افزایش یافته‌اند و وضعیت پایداری شعله تثبیت شده است.

این یافته‌ها اطلاعات ارزشمندی برای طراحی و بهره‌برداری بهینه از مشعل‌ها در کاربردهای صنعتی فراهم می‌کنند. با توجه به اینکه حد پایداری وابستگی زیادی به نسبت هم‌ارزی دارد، می‌توان این پارامتر را به‌دقت تنظیم کرد تا از عملکرد ایمن و کارآمد مشعل در توان‌های مختلف اطمینان حاصل شود. این رویکرد می‌تواند به کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش عمر مفید تجهیزات کمک کند.



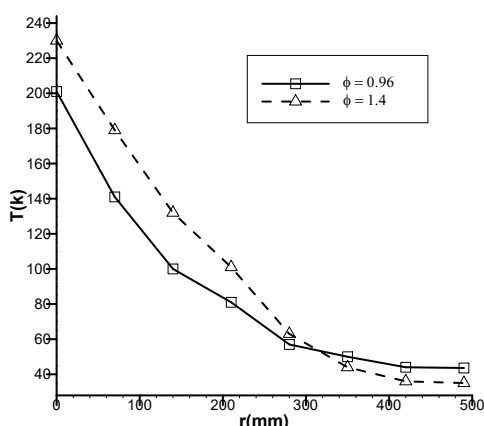
شکل ۵- تغییرات حد پایداری با توان مشعل

#### ۴-۴- بررسی اثر نسبت هم‌ارزی بر میدان دمای خارجی

در این قسمت، کاربرد مشعل سرعت‌بالا با دبی هوای نامناسب و اثرات آن بر روی میدان دما بررسی می‌شود. یکی از مشکلات به‌کارگیری این مشعل‌ها، در نظر نگرفتن خصوصیت اندازه حرکت بالای شعله و لزوم ایجاد شرایط مناسب برای یکنواختی دما است. در این بررسی، اثر تنظیم نبودن مشعل بر روی میدان دمای تولیدشده روی دیوار بررسی می‌شود. اندازه‌گیری دما در فاصله ۵ سانتیمتر از دیوار صورت می‌گیرد. دو حالت مختلف با توان ثابت ۴۱۳ کیلووات (دبی سوخت ثابت ۵/۹ مترمکعب بر ساعت) بررسی می‌شود. مشعل در فاصله ۱/۳ متر از دیوار قائم و به سمت دیوار نصب شده است. در حالت اول نسبت هم‌ارزی ۰/۹۶ و در حالت دوم، که بعنوان کاربرد نامناسب مطرح می‌شود، نسبت هم‌ارزی ۱/۴ است. بدیهی است سرعت جریان احتراقی در نسبت هم‌ارزی ۰/۹۶ بیشتر است. شکل ۷ تغییرات دما در جهت شعاعی در فاصله ۵ سانتیمتر از دیوار قائم را برای دو نسبت هم‌ارزی مختلف اشاره شده، نشان می‌دهد. روی خط مرکزی و نقاط نزدیک به آن به علت غنی‌تر بودن سوخت در نسبت هم‌ارزی ۱/۴، دما دارای مقدار بیشتری است. با افزایش فاصله شعاعی در هر دو نسبت مقدار دما، همانطور که شکل نشان می‌دهد، کم می‌شود. با توجه به شکل ۶ با مصرف مقدار گاز یکسان، در نسبت هم‌ارزی ۰/۹۶ تغییرات دما یکنواخت‌تر است و تمرکز گرما کمتری روی دیوار حاصل می‌شود. یکنواختی دما در پیش‌گرم کردن یا خشک‌کردن سازه و عملیات گرمای موجب بهبود کیفیت محصول می‌شود.

شکل ۷ طول شعله را در دو نسبت هم‌ارزی ۰/۹۶ و ۱/۴ نشان می‌دهد. در نسبت هم‌ارزی ۱/۴ سوخت نسبت به هم‌ارزی ۰/۹۶ غنی-

تر است. شکل ۷ نشان می‌دهد که برای این نسبت هم‌ارزی طول شعله بلندتر است (شکل ۷-ب). به دلیل تامین هوای مورد نیاز برای سوختن کامل سوخت، طول شعله افزایش یافته و و شعله ویژگی‌های مربوط به شعله‌های پیش مخلوط جزئی را داراست. افزایش بیش از حد طول شعله منجر به برخورد شعله با محصولات و دیواره محفظه احتراق و در نتیجه کاهش کیفیت احتراق می‌شود. در نتیجه، به‌کارگیری نامناسب مشعل علاوه بر اینکه موجب کاهش یکنواختی دما می‌شود، از طرفی بهره‌وری و کیفیت را نیز کاهش می‌دهد.



شکل ۶- تغییرات دما در جهت شعاع در فاصله ۵ سانتیمتر از دیوار قائم



(الف)



(ب)

شکل ۷-الف-نسبت هم‌ارزی ۰/۹۶، طول شعله ۲۳/۶ میلی‌متر، ب- نسبت هم‌ارزی ۱/۴، طول شعله ۵۲/۲ میلی‌متر

شکل ۸ روند تغییرات اکسیدهای نیتروژن (NOx) را در طول فاصله از ورودی مشعل نشان می‌دهد. نتایج ارائه‌شده در این نمودار بیانگر آن است که انتشار NOx در ابتدا با افزایش فاصله از ورودی مشعل افزایش می‌یابد، اما پس از رسیدن به یک فاصله معین، این مقدار به وضعیت ثابتی می‌رسد و تغییری نمی‌کند. در مراحل اولیه احتراق، تشکیل NOx به دلیل دمای بالا و واکنش‌های شیمیایی سریع در ناحیه نزدیک به سرمشعل بیشتر است. با پیشرفت فرآیند و افزایش فاصله از ورودی، احتراق کامل‌تر شده و شرایط دمایی به حالت تعادل می‌رسد. در نتیجه، تشکیل و انتشار اکسیدهای نیتروژن به یک مقدار ثابت می‌رسد. این

نقاط داغ موضعی منجر شود، که نیازمند کنترل دقیق در طراحی است. -تغییرات طول شعله

طول شعله به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم عملکردی مشعل، به دبی سوخت ورودی و توان مشعل وابسته است. نتایج نشان داد که با افزایش توان مشعل (افزایش دبی‌های ورودی سوخت)، طول شعله به‌آرامی افزایش می‌یابد.

همچنین، هنگامی که مخلوط سوخت و هوا غنی‌تر باشد (نسبت هم‌ارزی بالا)، طول شعله بلندتر شده و انتشار شعله در محور طولی گسترش بیشتری می‌یابد. این یافته‌ها برای طراحی محفظه احتراق و جلوگیری از برخورد شعله با دیواره‌های کوره بسیار ارزشمند هستند.

-حد پایداری شعله

یکی دیگر از نتایج کلیدی این تحقیق، بررسی حد پایداری شعله در بازه عملکرد مشعل بود. نتایج نشان داد که حد پایداری این مشعل تقریباً مستقل از توان است و بیشتر به نسبت هم‌ارزی مخلوط وابسته است. حد پایداری شعله در نسبت هم‌ارزی حدود ۰/۸ مشاهده شد که نشان‌دهنده تأثیر پارامترهای ترمودینامیکی (مانند نسبت هم‌ارزی) بر پایداری شعله است، نه عوامل دینامیکی مانند سرعت مخلوط ورودی.

با کاهش توان مشعل و دبی مخلوط، مکانیزم‌های پایداری‌سازی شعله مانند ایجاد جریان‌های گردابی ممکن است کارایی کمتری داشته باشند. با این حال، این مشعل عمدتاً برای عملکرد در دبی‌های بالا طراحی شده است، جایی که گرمادهی حداکثری اهمیت بیشتری دارد.

-مقایسه عملکرد در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف

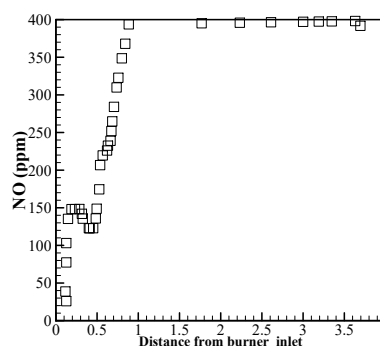
در شرایط عملیاتی با مصرف مقدار گاز یکسان، نسبت هم‌ارزی ۰/۹۶ میدان دمایی یکنواخت‌تر و تغییرات گرمای ملایم‌تری را ارائه می‌دهد. این حالت باعث کاهش تمرکز گرما بر دیواره مقابل مشعل شده و احتمال آسیب یا خوردگی گرمای را کاهش می‌دهد. در مقابل، نسبت هم‌ارزی بالاتر مانند ۱/۴ ممکن است به تمرکز گرما و افزایش فشار گرمای بر دیواره‌ها منجر شود.

این پژوهش نشان داد که نسبت هم‌ارزی، توان مشعل، و دبی سوخت ورودی تأثیرات قابل‌توجهی بر میدان دمایی، طول شعله، و حد پایداری شعله دارند. یافته‌های حاصل از این تحقیق می‌توانند در طراحی و بهینه‌سازی مشعل‌های صنعتی، افزایش کارایی فرآیندهای احتراقی، و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از آلاینده‌ها بسیار مفید باشند.

## ۶- منابع

- [1] Kernes V., Belohradsky P., Oral, J., Stehlik, P., Testing of gas and liquid fuel burner for power and process industries, Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology 2, 616 69 Brno, Czech Republic, 2008.
- [2] Lewis B., and Von Elbe G., Combustion, Flames and Explosion of Gases, 3rd Ed, Academic Press, Orlando, 1987.
- [3] Cheng R. K., and Yegian T., Mechanical Swirler for A Low-NO<sub>x</sub> Weak-Swirl Burner, United States Patent, USOO5879148, Mar. 9, 1999.
- [4] Bhoi P. R., Channiwala S. A., Optimization of producer gas fired premixed burner", Main Plant system, Mechanical Department, Energy Centre India, Department of Mechanical Engineering, Sardar Vallabhbhai National Institute of Technology, Deemed University, Surat 395 007, Gujarat, India, 2007.
- [5] Shy S. S., Lin W. J. and Peng K. Z., High-intensity turbulent premixed combustion: General correlations of turbulent

پایداری انتشار NO<sub>x</sub> به عواملی نظیر کاهش واکنش‌های مرتبط با تشکیل NO<sub>x</sub> و پراکندگی گازهای حاصل در دماهای پایین‌تر ارتباط دارد. علاوه بر این، میزان سوخت و هوا و نسبت هم‌ارزی می‌توانند بر این تغییرات تأثیر بگذارند، زیرا پارامترهای اصلی در تنظیم فرآیند احتراق و ترکیبات تولیدی آن هستند. تثبیت میزان NO<sub>x</sub> در فاصله معین از مشعل به طراحی محفظه احتراق نیز مرتبط است. طراحی صحیح می‌تواند به کاهش تجمع گازهای آلاینده در ناحیه‌های خاص کمک کرده و تأثیرات زیست‌محیطی را به حداقل برساند. این داده‌ها اطلاعات مفیدی برای طراحی مشعل‌ها و کوره‌های صنعتی فراهم می‌کنند، به‌طوری که بتوان با بهینه‌سازی شرایط احتراق، انتشار آلاینده‌های NO<sub>x</sub> را کاهش داده و فرآیندهای صنعتی را دوست‌دارتر محیط زیست کرد.



شکل ۸- تغییرات اکسید نیتروژن بر اساس فاصله از ورودی مشعل

## ۵- جمع‌بندی

این مطالعه به‌منظور تحلیل تجربی و دقیق یک مشعل سرعت‌بالا انجام شده است. هدف اصلی این پژوهش بررسی ویژگی‌های عملکردی مشعل، از جمله میدان دمایی، تأثیر نسبت هم‌ارزی، تغییرات طول شعله، و حد پایداری شعله تحت شرایط مختلف عملیاتی بود. اندازه‌گیری و تحلیل این پارامترها با ابزارهای پیشرفته و روش‌های سیستماتیک انجام شد و نتایج ارزشمندی ارائه گردید که به‌طور خلاصه در زیر توضیح داده شده است:

-بررسی میدان دمایی و تأثیر نسبت هم‌ارزی

نتایج نشان داد که تغییرات دما در فاصله‌های طولی و شعاعی مختلف تحت تأثیر نسبت‌های هم‌ارزی متفاوت قرار دارند. در نسبت هم‌ارزی ۰/۹۶، میدان دما روند یکنواخت‌تری داشت، به‌طوری که با افزایش فاصله محوری از سرمشعل، دمای محور مرکزی افزایش یافت و همزمان شیب منحنی دما کاهش پیدا کرد. این کاهش شیب ناشی از نفوذ گرما و انتقال بهتر انرژی به نواحی اطراف بود.

در هر دو نسبت هم‌ارزی ۰/۹۶ و ۱/۰۵، حداکثر دما در فاصله محوری  $x/D=5.5$  مشاهده شد و پس از آن، دمای محور مرکزی به‌تدریج کاهش یافت. همچنین، با افزایش شعاع از خط مرکزی، مقدار دما کاهش پیدا کرد.

در نسبت هم‌ارزی ۱/۰۵، به دلیل غنی‌تر بودن مخلوط سوخت و هوا، حداکثر دما بیشتر بود. این افزایش دما می‌تواند به تمرکز گرما و تولید

- burning velocities in a new cruciform burner, Proceedings of the Combustion Institute, 2000, 28, 561–568.
- [6] Bhoi P. R., Channiwala S. A., Emission characteristics and axial flame temperature distribution of producer gas fired premixed burner, Biomass and Bioenergy, 2009, 33, 469 – 477.
- [7] Lazic L., Brovkin V. L., Gupalo V., Gupalo E. V., Numerical and experimental study of the application of roof flat-flame burners, Applied Thermal Engineering, 2011, 31, 513 – 520.
- [8] Wang Y., Zhou Y., Effect of the coal blending ratio on NOx formation under multiple deep air-staged combustion, Energy Fuels, 2019, 34 (1), 853–862.
- [9] Ma L. Fang Q., Zhang C., Combustion and NO formation characteristics of pulverized coal co-firing with ammonia in a deep-air staging condition, Clean Coal Technology, 2022, 28 (3), 201–213.
- [10] Candel S, Duroa D., Schuller T, Dynamics of swirling flames, Annu. Rev. Fluid Mech, 2014. 46 (1), 147–173.
- [11] Candel S, Duroa D., Schuller T., Progress and challenges in swirling flame dynamics, Compt. Rendos Mec, 2012, 340 (11–12), 758–768.
- [12] Zhou C, Wang Y, Jin Q, Mechanism analysis on the pulverized coal combustion flame stability and NOx emission in a swirl burner with deep air staging, J. Energy Inst., 2019, 92 (2), 298–310