

## مشخصه‌های پایداری و تولید آلاینده NO<sub>x</sub> شعله‌های کم‌پیچش

محمد شهسواری\* و محمد فرشچی\*\*

دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا

(دریافت: ۱۳۹۱/۶/۲۱، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۱/۱۱/۱۷، پذیرش: ۹۱/۱۱/۲۵)

احتراق کم‌پیچش یکی از روش‌های نوین برای پایداری‌سازی شعله‌های پیش‌مخلوط کم‌سوخت است. شناخت مشخصه‌های پایداری و تولید NO<sub>x</sub> این نوع شعله‌ها و همچنین تأثیر تداخلات چند شعله کم‌پیچش بر پایداری و تولید NO<sub>x</sub> این شعله‌ها به کاربردی شدن این نوع احتراق در محفظه احتراق‌های مختلف کمک شایانی می‌کند. برای نیل به این هدف، در این مقاله، با به‌کارگیری مشعل‌های کم‌پیچش پره‌دار، مشخصه‌های پایداری و تولید NO<sub>x</sub> این نوع شعله‌ها بررسی شده و سپس سه نمونه مشعل مشابه بر روی یک حلقه محفظه احتراق در کنار هم قرار داده شده و با تغییر فاصله مشعل‌ها از یکدیگر پایداری و تولید NO<sub>x</sub> شعله‌های حاصل بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که پایداری این شعله‌ها وابسته به سرعت میانگین جریان مشعل، نسبت هم‌ارزی و نحوه دست‌یابی به شعله مطلوب (ایجاد شعله مطلوب از ناحیه کم‌سوخت و یا پرسوخت) است. تولید NO<sub>x</sub> این شعله‌ها با نسبت هم‌ارزی نسبت مستقیم دارد و مستقل از سرعت مخلوط سوخت و هوای خروجی از مشعل است. قرارگیری مشعل‌ها، در شرایطی که هر یک به‌صورت مجزا شعله پایدار تولید می‌کنند، با هر آرایشی در کنار هم موجب ناپایداری شدن شعله‌ها نمی‌شود و تنها تداخلات شعله‌ها را افزایش می‌دهد. این تداخلات موجب افزایش تولید NO<sub>x</sub> می‌شود.

**کلیدواژگان:** شعله کم‌پیچش، مشخصه‌های پایداری، آلاینده NO<sub>x</sub>، تداخلات شعله‌های کم‌پیچش

### مقدمه

احتراق پیش‌مخلوط امروزه، به‌منظور کاهش تولید آلاینده‌های حاصل از احتراق، مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشکل این نوع احتراق ناپایداری شعله در مناطق کم‌سوخت است. یکی از روش‌های کنترل پایداری در شعله‌های پیش‌مخلوط استفاده از جریان‌های پیچشی است. این نوع شعله‌ها به شعله‌های پیچشی مشهورند [۱]. شعله‌های پیچشی با استفاده از عدد بی‌بعدی به‌نام عدد پیچش، که توسط سایرد و بییر در سال ۱۹۷۴ پیشنهاد شد، دسته‌بندی می‌شوند. این عدد براساس حاصل تقسیم شار تکانه زاویه‌ای در جهت محور بر حاصل‌ضرب شار تکانه محوری در جهت محور در شعاع مشعل تعریف می‌شود [۲]. شعله‌هایی که عدد پیچش آن‌ها کمتر از ۰/۵ باشد را شعله‌های کم‌پیچش و شعله‌های با عدد پیچش بیش از ۰/۵ را شعله‌های پرپیچش می‌نامند [۳].

$$S = \frac{G_{ang}}{G_X \times R_b} = \frac{\int_0^{\infty} \rho u w r^2 dr}{R_b \times \int_0^{\infty} \rho \left( u^2 - \frac{W^2}{2} \right) r dr} \quad (1)$$

\* دانشجوی دکترا - نویسنده مخاطب (ایمیل: Shahsavari@ae.sharif.ir)

\*\* استاد (ایمیل: Farshchi@sharif.ir)

که در این رابطه  $G_{ang}$ ،  $G_x$  و  $R_b$  به ترتیب تکانه زاویه‌ای، تکانه خطی و شعاع مشعل است. همچنین  $\rho$ ،  $u$  و  $w$  به ترتیب دانسیته سیال، سرعت متوسط محوری و سرعت متوسط پیچشی است.

امروزه در اکثر محفظه احتراق‌های موتورهای توربینی از شعله‌های پرپیچش استفاده می‌شود. در این نوع شعله‌ها، پدیده‌ای به نام شکست گردابه باعث پدید آمدن ناحیه‌ای بازگشتی در نزدیکی دهانه مشعل شده که سازوکار اصلی پایداری شعله است. در این نوع احتراق، محصولات حاصل از احتراق به صورت پیوسته دمای مخلوط سوخت و هوا را در ناحیه بازگشتی بالا برده و آن را محترق می‌کنند [۵،۴]. وجود این ناحیه، که تقریباً ساکن است، باعث افزایش زمان توقف گازهای محترقه و افزایش تولید آلاینده  $NO_x$  می‌شود. به همین دلیل، مطالعات اخیر علمی به سمت شعله‌هایی بوده که نه تنها پایداری مناسبی داشته باشند، بلکه آلاینده  $NO_x$  کمتری تولید کنند. از میان روش‌های مختلف، بهترین انتخاب برای این اهداف شعله‌های کم‌پیچش است که در ابتدا در سال ۱۹۹۲ توسط چنگ و در قالب شعله‌های کم‌پیچش بدون پره معرفی شد. در این نوع شعله‌ها، ناحیه بازگشتی در نزدیکی دهانه مشعل وجود ندارد؛ در نتیجه دمای محلی شعله کمتر و تولید آلاینده  $NO_x$  نیز پایین‌تر است [۶].

سازوکار پایداری شعله‌های کم‌پیچش به این صورت است که وقتی جریان کم‌پیچش سوخت و هوا از مشعل خارج می‌شود، نیروهای گریز از مرکز ناشی از حرکت پیچشی جریان باعث منبسط شدن جریان محوری می‌شوند و آن را به سمت خارج واگرا می‌کنند [۷]. این واگرایی باعث کاهش سرعت محوری جریان می‌شود. سرعت شعله پیش‌مخلوط آشفته هر جا با سرعت جریان محلی برابر شد، شعله به صورت پایدار می‌ایستد. این سازوکار باعث می‌شود که شعله در فاصله کمی از دهانه مشعل بدون هیچ‌گونه نقطه اتکایی روی بدنه مشعل پایدار شود. دو حد ناپایداری در شعله‌های کم‌پیچش وجود دارد که شامل حد دمش<sup>۱</sup> و حد پشش<sup>۲</sup> شعله است. شعله در بین این دو محدوده پایدار است. دمش شعله حالتی است که شعله با جریان منتقل می‌شود و از دهانه مشعل دور شده و از بین می‌رود. پشش شعله نیز حالتی است که شعله به سمت داخل مشعل باز می‌گردد [۸]. شعله کم‌پیچش زمانی دمش می‌کند که سرعت جریان مخلوط سوخت و هوای خروجی از مشعل از سرعت سوزش شعله بیشتر باشد و برعکس این شعله زمانی پشش می‌کند که سرعت جریان خروجی از مشعل از سرعت سوزش شعله کمتر باشد [۸].

مشعل کم‌پیچش بدون پره نمونه اولیه این نوع مشعل‌هاست که توسط چنگ در سال ۱۹۹۲ معرفی شد [۶]. در این نوع مشعل، مخلوط سوخت و هوا از یک مجرای محوری با هوای خروجی از دو یا چند مجرای مماسی برخورد کرده و جریان کم‌پیچش را ایجاد می‌کند. در این مشعل‌ها، عدد پیچش با تغییر دبی جریان محوری و مماسی تغییر می‌کند. پایداری این نوع مشعل‌ها وابسته به عدد پیچش است [۸]. مشکل اصلی این مشعل‌ها هزینه بالای ساخت و پیچیدگی مشعل است [۹].

ییگاین و چنگ در سال ۱۹۹۶، برای کاهش هزینه‌های ساخت و پیچیدگی این مشعل‌ها، نمونه پره‌دار این مشعل‌ها را توسعه دادند. در این نوع مشعل، مخلوط سوخت و هوا از دو مجرا عبور کرده و جریان پیچشی را ایجاد می‌کند؛ مجرای زاویه‌ای که متشکل از پره‌های ثابت است و مجرای مرکزی که به صورت منسدد طراحی شده است. تداخل این دو جریان در خروجی از مشعل باعث ایجاد شعله کم‌پیچش می‌شود [۹]. این مشعل‌ها، برخلاف نوع بدون پره، در دبی‌های مختلف مخلوط سوخت و هوا دارای عدد پیچش ثابتی هستند. به همین دلیل، در مطالعه حاضر این نوع مشعل استفاده شده است.

ییگاین و چنگ در سال ۱۹۹۶ منحنی پایداری شعله‌های کم‌پیچش حاصل از مشعل پره‌دار را برحسب نسبت هم‌ارزی و سرعت مخلوط سوخت و هوای خروجی از مشعل بررسی کردند و نواحی پشش و دمش شعله را ارزیابی کردند. نواحی پشش شعله، با افزایش نسبت انسداد مشعل، کاهش یافته و همچنین با افزایش سرعت این ناحیه از بین می‌رود. این بررسی‌ها در بازه محدودی از دبی‌های مخلوط سوخت و هوا انجام شده است [۹]. از آنجا که این مشعل‌ها باید توانایی کار در محفظه احتراق‌ها با دبی‌های مختلف را داشته باشند، بررسی آن‌ها در دبی‌های مختلف سوخت و هوا الزامی است. مطالعه مراجع نشان می‌دهد که

1. Blow off limit  
2. Flash back limit

پایداری یک مشعل کم‌پیچش پره‌دار به‌صورت کلی در دبی‌های مختلف مخلوط سوخت و هوا در منابع به‌صورت خاص بررسی نشده است، اما تحلیل‌های زیادی در زمینه شکل و ساختار این شعله‌ها انجام شده است.

چنگ در سال ۱۹۹۵ فیزیک این شعله‌ها را با استفاده از روش LDA<sup>۱</sup> بررسی کرد و ملاحظه کرد که با تغییر نسبت هم‌ارزی، نیم‌رخ<sup>۲</sup> سرعت شعله عوض می‌شود. همچنین، نیم‌رخ سرعت شعله کم‌سوخت بسیار شبیه به نیم‌رخ سرعت جریان بدون احتراق کم‌پیچش است [۱۰]. ایشان و همکارانش در سال ۲۰۰۵ شکل شعله‌های کم‌پیچش و پرپیچش را با استفاده از روش PIV<sup>۳</sup> بررسی کردند و دریافته‌اند که در شعله‌های کم‌پیچش نیز، همانند شعله‌های پرپیچش، یک ناحیه بازگشتی ملاحظه می‌شود، اما این ناحیه بازگشتی در پایین‌دست شعله قرار دارد و تأثیری بر پایداری شعله ندارد [۵]. آن‌ها همچنین در سال ۲۰۰۸ با استفاده از روش PIV شکل شعله را در داخل محفظه احتراق‌های مختلف بررسی کردند. این بررسی‌ها نشان داد زمانی که شعله کم‌پیچش در محفظه احتراق قرار می‌گیرد، یک ناحیه بازگردشی قوی در گوشه محفظه احتراق اتفاق می‌افتد که باعث بازشدن شعله می‌شود [۱۱]. لگران و همکاران در سال ۲۰۱۰ شکل این شعله‌ها و جریان‌های کم‌پیچش بدون احتراق را با استفاده از روش PIV بررسی کردند. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که دلیل اصلی تفاوت بین میدان جریان شعله کم‌پیچش و جریان سرد کم‌پیچش، نبود آشفستگی حاصل از احتراق در جریان‌های سرد کم‌پیچش است [۱۲].

بررسی آلاینده‌های حاصل از شعله‌های کم‌پیچش یکی دیگر از اهداف مهم مطالعات اخیر بوده است. چنگ و همکاران در سال ۱۹۹۶ و ۱۹۹۸ تولید آلاینده‌های مشعل‌های پره‌دار و بدون پره را در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد که شعله‌های حاصل از هر دو مشعل در نسبت هم‌ارزی‌های کمتر از ۰/۸ به مقدار یکسانی آلاینده NO<sub>x</sub> تولید می‌کنند، اما در نسبت هم‌ارزی‌های بالاتر شعله حاصل از مشعل پره‌دار مقدار کمتری NO<sub>x</sub> تولید می‌کند. نتایج همچنین نشان می‌دهد که در یک نسبت هم‌ارزی ثابت تولید آلاینده مونوکسید کربن در مشعل‌های بدون پره نسبت به مشعل‌های با پره کمتر است [۹،۸،۳]. جانسون و همکاران در سال ۲۰۰۴ تولید آلاینده‌های یک مشعل کم‌پیچش پره‌دار را با یک مشعل پرپیچش پره‌دار مقایسه کردند. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که تولید آلاینده NO<sub>x</sub> شعله کم‌پیچش به‌صورت قابل ملاحظه‌ای کمتر از شعله پرپیچش است. دلیل کاهش آلاینده NO<sub>x</sub> در شعله کم‌پیچش کاهش زمان توقف گزارش شده است [۵]. سکورا و آگراوال در سال ۲۰۰۷، با مدل‌سازی احتراق در نرم‌افزار کمکین، با استفاده از مدل PSR<sup>۴</sup> نشان دادند که با افزایش زمان توقف محصولات احتراق میزان تولید آلاینده NO<sub>x</sub> افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین تولید آلاینده شعله حاصل از مشعل کم‌پیچش پره‌دار را با استفاده از دستگاه آنالیزور گاز در فواصل مختلف پایین‌دست و شعاعی شعله اندازه‌گیری کردند و ملاحظه کردند که تولید آلاینده NO<sub>x</sub> در نقاط مختلف شعاعی پایین‌دست شعله تقریباً یکسان است، اما با افزایش فاصله در طول پایین‌دست شعله، میزان تولید این آلاینده افزایش و سپس در ناحیه به فاصله ۵ برابر قطر مشعل در پایین‌دست شعله این آلاینده ثابت باقی می‌ماند. همچنین، افزایش دبی مخلوط سوخت و هوا (در یک نسبت هم‌ارزی ثابت) بر تولید NO<sub>x</sub> تقریباً بی‌اثر است [۱۳]. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که تولید آلاینده NO<sub>x</sub> شعله‌های حاصل از مشعل‌های پره‌دار در سرعت‌های مختلف مخلوط سوخت و هوای خروجی از مشعل در منابع به‌صورت خاص بررسی نشده است. این مسئله در محفظه احتراق‌ها با شرایط و دبی‌های سوخت و هوای مختلف اهمیت پیدا می‌کند.

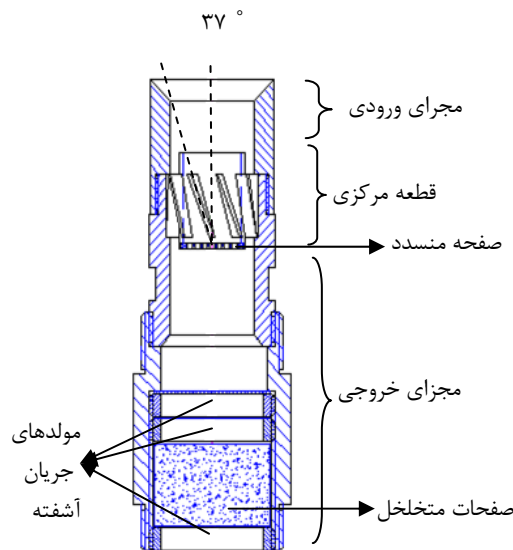
در مطالعه پیش رو، از مشعل کم‌پیچش پره‌دار برای بررسی پایداری و تولید آلاینده NO<sub>x</sub> شعله‌های کم‌پیچش استفاده شده است. در این مقاله، هدف اولیه توسعه منحنی پایداری شعله‌های کم‌پیچش و بررسی میزان تولید آلاینده NO<sub>x</sub> این شعله‌ها در محدوده وسیع‌تری از دبی‌های سوخت و هواست. در ادامه مقاله، مشخصه‌های پایداری چندین مشعل هم‌جوار و بررسی میزان تولید آلاینده NO<sub>x</sub> این شعله‌ها، در زمانی که چند مشعل کم‌پیچش به‌طور هم‌زمان در یک حلقه محفظه احتراق

1. Laser Doppler Anemometry  
2. Profile  
3. Particle Image Velocimetry  
4. Perfectly Stirred Reactor

در کنار هم کار می‌کنند، بررسی می‌شود. این مهم در تحقیقات گذشته بررسی نشده است. از آنجا که در یک محفظه احتراق حلقوی چند مشعل کم‌پیچش در کنار هم قرار می‌گیرند، بررسی رفتار شعله‌های حاصل از مشعل‌های هم‌جوار از نظر پایداری و تولید  $NO_x$  اهمیت فراوانی در طراحی محفظه احتراق و چیدمان مشعل‌ها پیدا می‌کند. در مطالعه حاضر، سه مشعل کم‌پیچش یکسان طراحی و ساخته شده است و سپس پایداری و تولید آلاینده  $NO_x$  شعله‌های حاصل از هر یک از این مشعل‌ها بررسی شده است. پس از این بررسی‌ها، سه مشعل مشابه بر روی یک حلقه محفظه احتراق در سه فاصله مختلف از هم قرار گرفته‌اند و پایداری و آلاینده  $NO_x$  شعله‌های حاصل در هر یک از این آرایش‌ها بررسی شده است.

## روش تجربی

در این مطالعه تجربی، از سه مشعل کم‌پیچش پره‌دار یکسان با عدد پیچش  $0/5$  استفاده شده است. ابعاد این مشعل‌ها براساس مطالعات پیشین شهسواری و فرشچی در سال  $2010$  در بررسی تأثیر پارامترهای هندسی مشعل کم‌پیچش پره‌دار بر پایداری شعله انتخاب شده است [14]. ساخت این سه مشعل به‌وسیله روش‌های دقیق انجام شده و خطای ساخت قطعات  $0/5$  میلی‌متر است. مطابق شکل 1، این مشعل‌ها از 4 قطعه اصلی مجرای ورودی، قطعه مرکزی، صفحه منسدد و مجرای خروجی تشکیل شده‌اند.



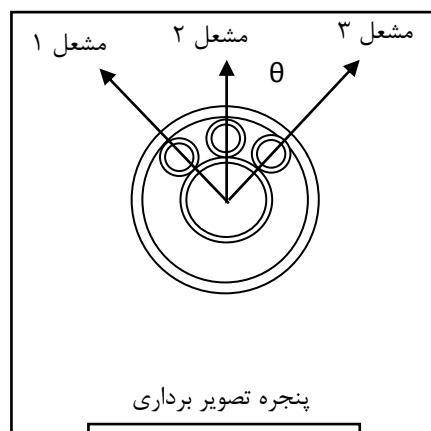
شکل 1- طر حواره مشعل کم‌پیچش پره‌دار

مجرای ورودی مشعل با قطر داخلی و طول به ترتیب  $40$  و  $105$  میلی‌متر، شامل صفحات متخلخل و مولدهای جریان آشفته است. برای جلوگیری از پخش شعله به داخل مجاری حامل مخلوط سوخت و هوا، از صفحات متخلخل استفاده شده است. این صفحات متشکل از تراشه‌های فلزی است و زمانی که شعله به داخل مجرا باز می‌گردد، شعله را خاموش می‌کند. همچنین، برای یکنواخت کردن جریان سوخت و هوای ورودی به مشعل‌ها، از مولدهای جریان آشفته در قالب 3 صفحه توری با منافذ  $1$  میلی‌متر مربع استفاده شده که 2 عدد از این توری‌ها در بالای محیط متخلخل و دیگری قبل از آن تعبیه شده است. قطعه مرکزی مشعل دارای قطر داخلی و ارتفاع به ترتیب  $28$  و  $43$  میلی‌متر است که دیواره خارجی آن دارای 9 پره با زاویه  $37$  درجه نسبت به جریان ورودی است. صفحه منسدد به شکل دایره است و در انتهای قطعه مرکزی قرار می‌گیرد و ضخامت آن 3

میلی متر انتخاب شده است. این صفحه دارای ۲۹ سوراخ با قطر ۲/۵ میلی متر است که امکان انسداد بخشی از جریان را فراهم می کند. مجرای خروجی با قطر داخلی و طول به ترتیب ۴۰ و ۷۰ میلی متر برای اختلاط جریان های گذرنده از قطعه مرکزی و صفحه منسدد و ایجاد جریان کم پیچش استفاده شده است. برای جلوگیری از تغییر ناگهانی جریان در خروجی از مشعل، لبه خروجی با زاویه ۴۵ درجه پخ زده شده است.

در این مطالعه، نسبت قطر حلقه محفظه احتراق به قطر مشعل ها براساس توربین گاز مدل ۷۹۴.۲ انتخاب شده است. در محفظه احتراق موتور ۷۹۴.۲ مشعل ها به صورت دایروی در کنار هم قرار گرفته اند و نسبت شعاع حلقه محفظه احتراق به شعاع مشعل ها ۴/۱ است. از آنجا که قطر خارجی مشعل های ساخته شده ۶۰ میلی متر است، مطابق شکل ۲، قطر حلقه محفظه احتراق ۲۵۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. برای تعیین فاصله مشعل ها از یکدیگر، در زیر این حلقه یک دسته حفره تعبیه شده که مشعل ها با استفاده از یک ضامن در آن ها قفل می شوند. قطر این حفره ها ۳ میلی متر و زاویه آن ها از هم نسبت به مرکز حلقه ۴/۵ درجه است. در شکل ۲،  $\theta$  زاویه بین مشعل ها نسبت به مرکز حلقه محفظه احتراق است. در این مطالعه، برای بررسی تأثیر تداخلات شعله های کم پیچش، مقادیر ۳۶، ۴۵ و ۵۴ درجه برای زاویه  $\theta$  انتخاب شده است.

تحقیقات نشان می دهد که اگر شعاع محفظه احتراق ۳ تا ۵ برابر بزرگ تر از شعاع مشعل باشد، محفظه احتراق تأثیری بر ساختار شعله ندارد [۱۱]. در این پژوهش، به منظور اطمینان از بی تأثیر بودن محفظه بر شعله ها، شعاع جداره های محفظه احتراق ۳/۴۲ برابر شعاع حلقه محفظه احتراق در نظر گرفته شده است. از آنجا که این محفظه بر ساختار شعله تأثیری ندارد، بنابراین مقطع آن می تواند مربع نیز باشد. به همین منظور، به جای محفظه احتراق استوانه ای، از یک محفظه احتراق مکعبی استفاده شده که استوانه فرضی را در خود محاط کند. در یکی از اضلاع این مکعب فلزی، پنجره مربعی شیشه ای با ضلع ۴۸۸ میلی متر تعبیه شده که امکان تصویربرداری از شعله را فراهم می کند (شکل ۲).

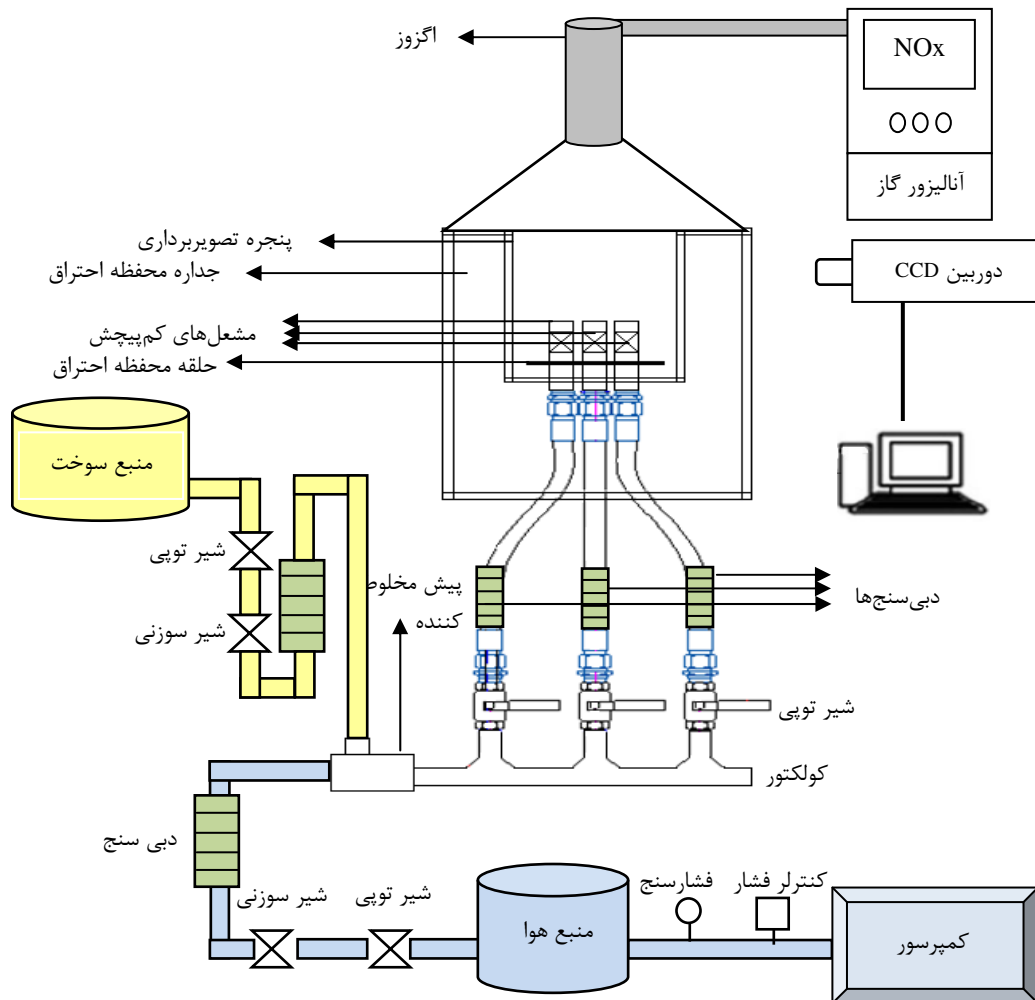


شکل ۲- طرحواره محفظه احتراق

سیستم آزمایش مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. هوای مورد نیاز برای آزمایش توسط یک کمپرسور تأمین و در مخازن تحت فشار ذخیره شده است. هوای منتقل شده از مخازن با عبور از یک شیر توپی و یک شیر سوزنی به دبی سنج هوا منتقل می شود. برای سنجش دبی هوا در آزمایش های تک مشعل از دبی سنج با ظرفیت ۴ تا ۴۰ متر مکعب بر ساعت و در آزمایش های سه مشعل به صورت هم زمان از دبی سنج با ظرفیت ۱۰ تا ۱۰۰ متر مکعب بر ساعت استفاده شده است که دقت آن ها به ترتیب ۰/۸ و ۲ متر مکعب بر ساعت است. سوخت مورد نیاز از کپسول های گاز پروپان تأمین شده و با عبور از یک شیر توپی و یک شیر سوزنی به دبی سنج سوخت منتقل شده است. برای سنجش دبی سوخت در آزمایش های

تک‌مشعل از دبی‌سنج با ظرفیت ۰ تا ۲ متر مکعب بر ساعت و در آزمایش‌های سه‌مشعل به‌صورت هم‌زمان از دبی‌سنج با ظرفیت ۱ تا ۱۰ مترمکعب بر ساعت استفاده شده است که دقت آن‌ها ۰/۲ مترمکعب بر ساعت است. سوخت و هوا در پیش‌مخلوط کننده با هم مخلوط شده و از طریق کولکتور، شیرهای کنترلی و دبی‌سنج‌ها (با ظرفیت‌های ۴ تا ۴۰ متر مکعب بر ساعت) به صورت مساوی به سه مجرای انعطاف‌پذیر منتقل می‌شود. مخلوط سوخت و هوا سپس با عبور از صفحات متخلخل و مولدهای جریان آشفته وارد مشعل‌ها می‌شود.

برای ثبت مشخصه‌های پایداری شعله کم‌پیچش از دوربین CCD با ۱۲/۱ میلیون پیکسل و ۳۰ فریم در ثانیه استفاده شده است. برای اندازه‌گیری گازهای حاصل از احتراق از دستگاه سنجش گازها لانکوم ۳ استفاده شده است. پراپ این دستگاه در فاصله ۵ متری از مشعل‌ها قرار گرفته است. این دستگاه مقادیر آلاینده‌های NOx را بر حسب ppm و میزان اکسیژن را بر حسب درصد حجمی محاسبه می‌کند. دقت این دستگاه در اندازه‌گیری درصد اکسیژن  $\pm 1$  درصد حجمی و در اندازه‌گیری NOx برابر  $\pm 1$  ppm است.



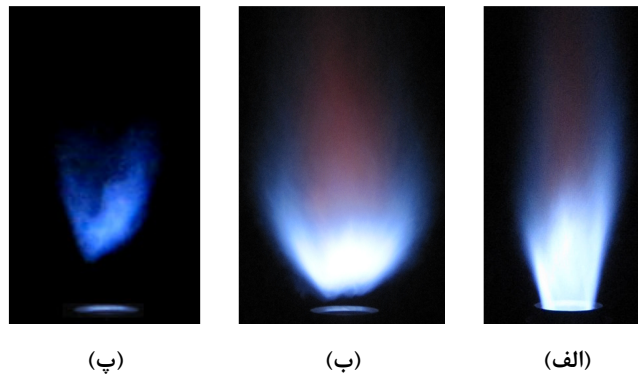
شکل ۳- طرحواره سیستم آزمایش

برای انجام آزمایش‌های هر یک از مشعل‌ها و چند مشعل به صورت هم‌زمان ابتدا شیرهای تویی و سوزنی خط انتقال سوخت باز شده و یک شعله غیرپیش‌آمیخته چسبیده به لبه مشعل ایجاد شده است. سپس، با استفاده از شیرهای سوزنی مجاری هوا و سوخت، شعله پیش‌مخلوط با نسبت هم‌ارزی ۲ ایجاد شده و با کاهش دبی سوخت (کاهش نسبت هم‌ارزی) تغییرات پایداری شعله و تولید NOx ثبت شده است.

## نتایج و بحث

در این قسمت به بررسی نتایج حاصل از بررسی‌های تجربی پرداخته می‌شود. در ابتدا شعله کم‌پیچش پایدار و ایدئال و مشخصه‌های ظاهری آن بررسی می‌شود. سپس، با تغییر نسبت هم‌ارزی و دبی خروجی از مشعل، پایداری و تولید آلاینده NOx این نوع شعله‌ها تحلیل می‌شود. پس از شناخت محدوده پایدار مشعل، سه مشعل مشابه در شرایطی که هر یک به صورت مجزا شعله پایدار تولید می‌کنند در کنار هم قرار گرفته و اثر تغییر فاصله بین مشعل‌ها بر پایداری و تولید آلاینده NOx شعله‌ها بررسی می‌شود.

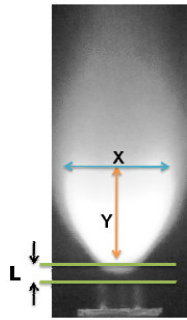
رفتار شعله‌های کم‌پیچش بسیار وابسته به سرعت مخلوط سوخت و هوای خروجی از مشعل است. به همین دلیل، در تمامی این بررسی‌ها، به جای دبی مخلوط سوخت و هوا از سرعت استفاده شده است. دانسیته مخلوط سوخت و هوا، قطر مجرا و دبی مخلوط سوخت و هوا مشخص است. بنابراین، سرعت مخلوط سوخت و هوای خروجی از مشعل قابل محاسبه است. شعله کم‌پیچش پایدار شعله‌ای است که به صورت جداشده در بالای مشعل قرار گیرد. این شعله زمانی ناپایدار می‌شود که به داخل مشعل باز گردد (پسش کند) و یا خاموش شود (دمش کند). در شکل ۴، نمونه‌ای از شعله پسش کرده، شعله معلق پایدار و شعله در آستانه دمش نشان داده شده است.



شکل ۴- نمونه‌ای از (الف) شعله کم پیچش پسش کرده، (ب) شعله پایدار و (پ) شعله در آستانه دمش

## مشخصه‌های شعله کم پیچش پایدار

در کاربردهای صنعتی، همواره از مشعل‌های کم پیچش در محدوده پایداریشان بهره‌برداری می‌شود. به همین دلیل، مشخصات ظاهری شعله‌های کم پیچش در این محدوده اهمیت فراوانی دارد. مشخصه‌های ظاهری شعله کم پیچش و تغییرات آن‌ها با نسبت هم‌ارزی و سرعت مخلوط سوخت هوای خروجی از مشعل در انتخاب مشعل مناسب برای استفاده در یک محفظه احتراق اهمیت ویژه‌ای دارد. این مشخصات شامل طول، عرض و ارتفاع جدایش شعله از لبه مشعل است (شکل ۵). طول و ارتفاع جدایش شعله از مشعل، طول محفظه احتراق را محدود می‌کند و عرض شعله نیز تعیین‌کننده تعداد مشعل مورد استفاده در یک محفظه احتراق حلقوی است.

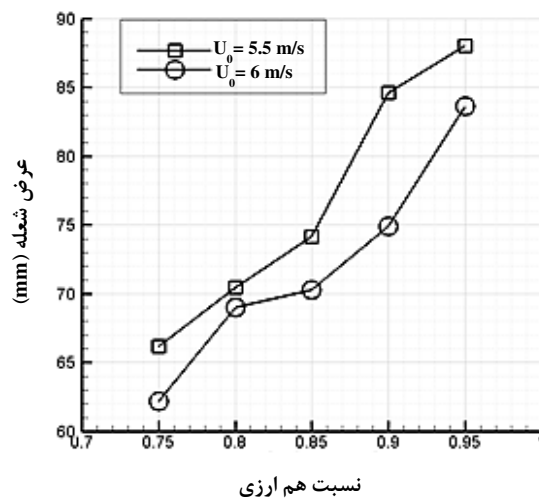


شکل ۵- شعله پایدار کم پیچش و مشخصات ظاهری آن

جریان پیچشی در خروجی از مشعل واگرا می‌شود و سرعت محوری جریان در هسته کمینه و در نواحی اطراف بیشینه است [۹]. اولین نقطه تشکیل شعله در محور مرکزی جریان است و با توجه به بالابودن سرعت جریان محلی اطراف این نقطه، شرط برابری سرعت شعله آشفته و سرعت جریان محلی سوخت و هوا در مناطق پایین دست تر جریان ارضا شده و شکل شعله همانند کاسه می‌شود (شکل ۵). با افزایش سوخت، سرعت شعله آشفته زیاد می‌شود و در نتیجه آن، اطراف شعله که در پایین دست تشکیل شده است، با غلبه بر سرعت جریان محلی، به نواحی نزدیک تر به مشعل جابه‌جا می‌شود. این سازوکار باعث پهن شدن شعله و افزایش زاویه واگرایی شعله می‌شود.

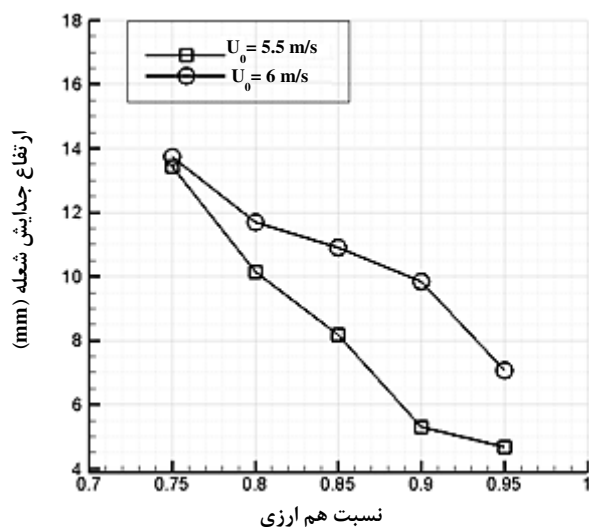
برای بررسی تأثیر نسبت هم‌ارزی و سرعت مخلوط سوخت و هوای خروجی از مشعل بر شکل شعله، از شعله تصویربرداری شده و سپس با استفاده از شدت نور هر تصویر شکل شعله استخراج شده است. این بررسی‌ها در دو سرعت مخلوط سوخت و هوای ۵/۵ و ۶ متر بر ثانیه، که شعله کاملاً پایدار است، انجام شده است.

نتایج بررسی تغییرات عرض و طول شعله با سرعت و نسبت هم‌ارزی در شکل ۶ و ۷ آمده است. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش نسبت هم‌ارزی به پهنا و طول شعله افزوده می‌شود، زیرا شرط برابری سرعت شعله آشفته با سرعت جریان محلی در نقاط بیشتری از میدان جریان امکان‌پذیر است. همچنین، در یک نسبت هم‌ارزی ثابت، با افزایش سرعت مخلوط سوخت و هوا، عرض و طول شعله کاهش می‌یابد، زیرا شرط برابری سرعت شعله آشفته با سرعت جریان محلی در یک مقطع عرضی جریان با افزایش سرعت در نقاط کمتری امکان‌پذیر است. تغییرات طول جدایش شعله با نسبت هم‌ارزی و سرعت مخلوط سوخت و هوا در شکل ۸ نشان داده شده است.

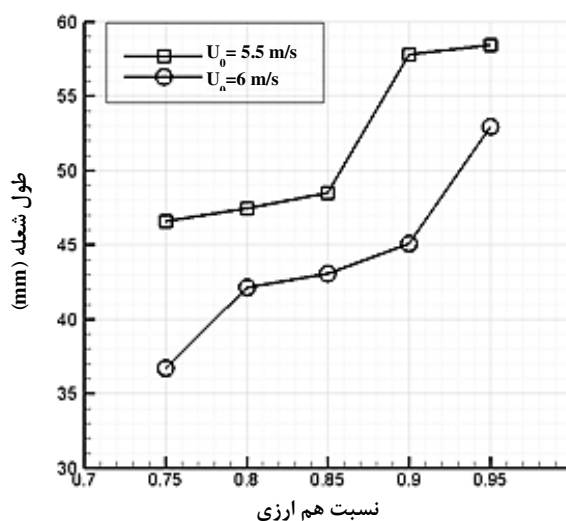


شکل ۶- تغییرات عرض شعله با نسبت هم‌ارزی و سرعت مخلوط سوخت و هوای خروجی از مشعل





شکل ۸ - تغییرات ارتفاع جدایش شعله با نسبت هم ارزی و سرعت مخلوط سوخت و هوای خروجی از مشعل



شکل ۷ - تغییرات طول شعله با نسبت هم ارزی و سرعت مخلوط سوخت و هوای خروجی از مشعل

با افزایش نسبت هم ارزی، طول جدایش شعله کاهش می یابد، زیرا ناحیه شعله افزایش می یابد و شعله تمایل به نزدیک شدن به لبه خروجی مشعل را دارد. با افزایش سرعت مخلوط سوخت و هوا در یک نسبت هم ارزی ثابت طول جدایش شعله افزایش می یابد، زیرا با افزایش سرعت جریان شرط برابری سرعت شعله آشفته و جریان محلی در نواحی پایین دست تر شعله ارضا می شود.

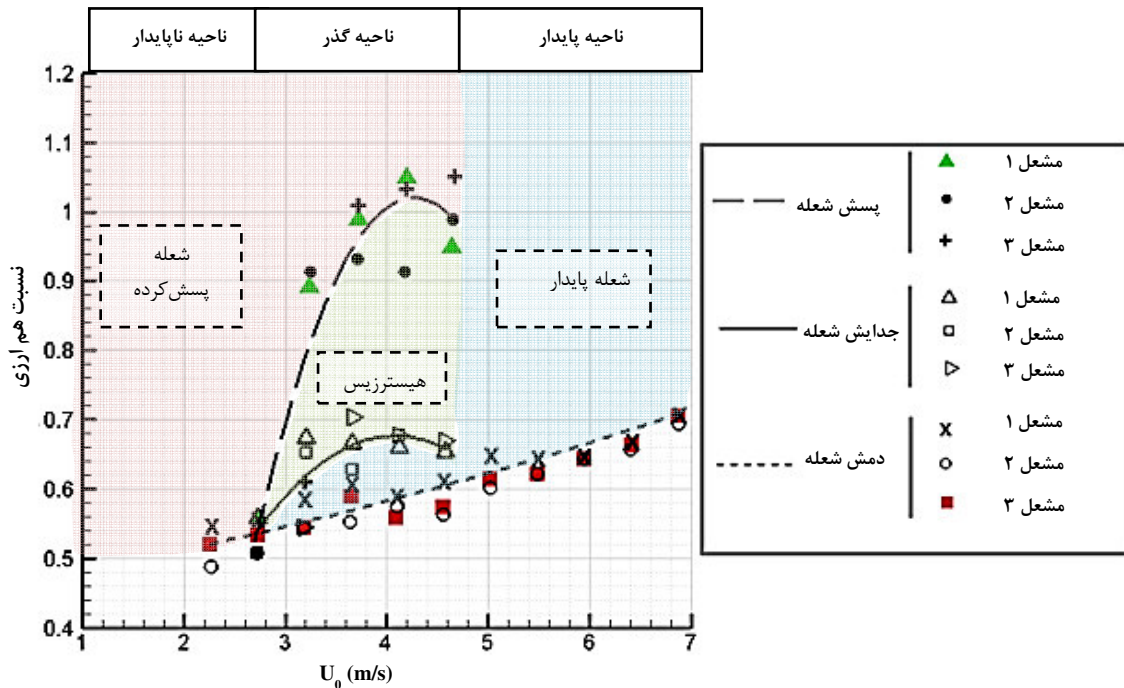
### مشخصه های پایداری شعله کم پیچش

در این قسمت، هدف بررسی مشخصه های پایداری شعله حاصل از مشعل کم پیچش پره دار است. به این منظور هر یک از سه مشعل کم پیچش به صورت مجزا بررسی شده اند، زیرا خطای ساخت مشعل ها و سوار کردن قطعات امکان تغییر در منحنی پایداری مشعل را ایجاد می کند. منحنی پایداری این مشعل ها براساس نسبت هم ارزی و سرعت مخلوط سوخت و هوای خروجی از مشعل بیان شده که در شکل ۹ آمده است. برای یافتن این منحنی، نسبت هم ارزی در سرعت های مخلوط سوخت و هوای ثابت تغییر داده شده است. منحنی پایداری یک مشعل کم پیچش شامل سه ناحیه کلی است که این نواحی براساس سرعت جریان مخلوط سوخت و هوای خروجی از مشعل تقسیم بندی می شوند. شایان ذکر است که پایداری در نسبت هم ارزی های پایین (کمتر از ۱) بررسی شده است، زیرا مشعل های کم پیچش در نواحی کم سوخت مورد بهره برداری قرار می گیرند.

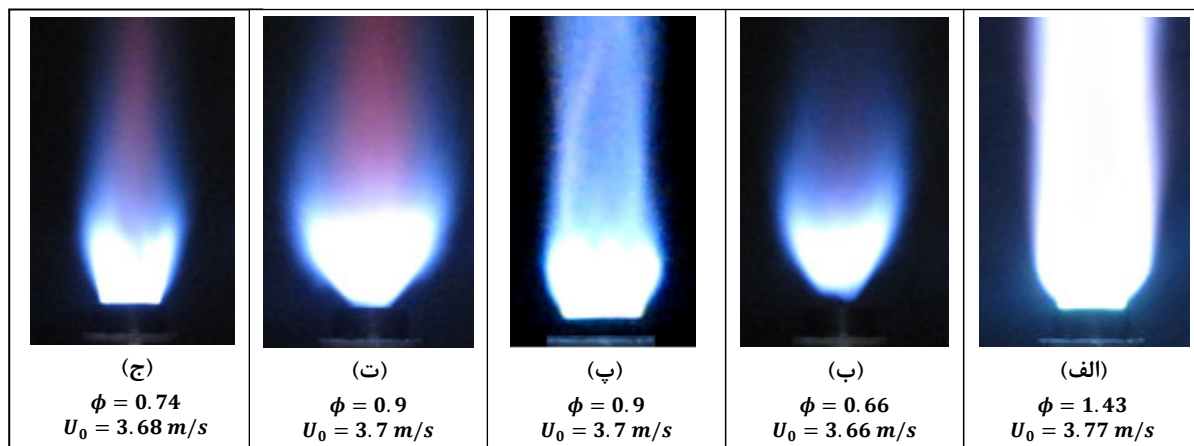
ناحیه ناپایدار منحنی پایداری مشعل کم پیچش منطقه ای است که در آن شعله دچار پش می شود و از مشعل جدا نمی شود. در این ناحیه، سرعت جریان محلی همواره از سرعت شعله آشفته پایین تر است و شعله بر جریان محلی غلبه کرده و به داخل مشعل برمی گردد. این رفتار شعله در سرعت های پایین مخلوط سوخت و هوا مشاهده می شود.

در ناحیه گذر پدیده های مختلفی رخ می دهد. در این ناحیه، بسته به نسبت هم ارزی و نحوه تنظیم نسبت هم ارزی شعله، پدیده های برگشت شعله، جدا شدن شعله و یا هر دو می تواند اتفاق بیفتد. در این ناحیه، سرعت شعله آشفته با سرعت جریان محلی هم مرتبه است. به عنوان نمونه، مشعل کم پیچش در دبی هوای ۱۶ لیتر در دقیقه را در نظر بگیرید (شکل ۱۰). این مشعل در نسبت هم ارزی های بالا (بیش از ۱) شعله پش کرده را ایجاد می کند (شکل ۱۰-الف)، زیرا در این نواحی سرعت شعله آشفته از سرعت جریان محلی بیشتر است. با کاهش نسبت هم ارزی و کاهش سرعت شعله آشفته در نواحی کم سوخت شعله جدا می شود (شکل ۱۰-ب)، زیرا با کاهش نسبت هم ارزی پیش از خاموشی شعله، سرعت شعله آشفته با سرعت جریان

محلّی برابر می‌شود و شعله بسیار ضعیفی از مشعل جدا می‌شود. در صورتی که نسبت هم‌ارزی دوباره افزایش یابد، در همان محدوده‌ای که پیش از این شعله پخش کرده وجود داشت (شکل ۱۰-ا)، شعله جدا شده مشاهده می‌شود (شکل ۱۰-ت). به عبارت دیگر، در این محدوده از نسبت هم‌ارزی هم امکان پخش شعله و هم امکان جدایش آن وجود دارد. این ناحیه را ناحیه هیستریزس<sup>۱</sup> مشعل می‌نامیم، زیرا پایداری وابسته به مسیر ایجاد شعله است. با افزایش بیشتر سوخت، شعله دوباره پخش می‌کند (شکل ۱۰-ج). در این شکل  $\phi$  نشان‌دهنده نسبت هم‌ارزی است.



شکل ۹- منحنی پایداری سه مشعل کم پیچش مشابه



شکل ۱۰- شعله‌های کم پیچش در دبی هوای ۱۶ لیتر در دقیقه، (الف) شعله پخش کرده (ب) شعله جدا شده در ناحیه کم سوخت (پ) شعله پخش کرده در ناحیه هیستریزس (با کاهش نسبت هم‌ارزی از ناحیه شعله پخش کرده) (ت) شعله جدا شده در ناحیه هیستریزس (با افزایش نسبت هم‌ارزی از ناحیه شعله جدا شده) (ج) شعله پخش کرده در ناحیه هیستریزس (با کاهش نسبت هم‌ارزی از ناحیه شعله پخش کرده)

1. Hysteresis region

ناحیه پایدار منحنی پایداری مشعل کم‌پیچش منطقه‌ای است که در آن شعله همواره از مشعل جدا شده است و با افزایش سوخت دچار پشش نمی‌شود، زیرا در این ناحیه سرعت جریان محلی با سرعت شعله آشفته برابر است. تنها در نزدیکی نواحی خاموشی شعله، سرعت جریان محلی بر سرعت شعله آشفته غلبه کرده و باعث دمش آن می‌شود. این رفتار شعله در سرعت‌های بالای مخلوط سوخت و هوا مشاهده می‌شود.

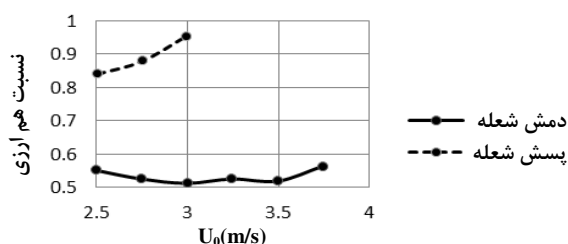
این بررسی‌ها برای هر یک از مشعل‌ها حداقل ۳ بار تکرار شده و انحراف معیار برای هر یک از نقاط مورد آزمایش محاسبه شده است. از آنجا که در هر آزمایش سرعت مخلوط سوخت و هوا ثابت نگاه داشته شده و نسبت هم‌ارزی متغیر بوده است، انحراف معیار براساس نسبت هم‌ارزی بیان شده است. مقدار میانگین انحراف معیار نتایج براساس نسبت هم‌ارزی در هر سه مشعل ۰/۰۲۲۴۵ و مقدار ماکزیمم آن ۰/۰۵۰۶۹ است. بیشترین مقدار انحراف معیار در نواحی گذر و کمترین مقدار در نواحی پایدار مشعل‌ها ملاحظه شده است. این مطلب نشان می‌دهد که نتایج تکرارپذیری مناسبی داشته‌اند.

سه مشعل کم‌پیچش با دقت ۰/۵ میلی‌متر و یکسان ساخته شده‌اند. بنابراین، انتظار می‌رود رفتار یکسانی را در نسبت هم‌ارزی‌ها و سرعت‌های مخلوط سوخت و هوای مختلف نشان دهند، اما عوامل مختلف از جمله دقت ساخت و شرایط آزمایش بر شعله‌های حاصل بی‌تاثیر نیست. به همین منظور، در سرعت‌های مخلوط سوخت و هوای یکسان، نسبت هم‌ارزی منحنی‌های دمش، پشش و جدایش سه مشعل با هم مقایسه شده و میزان انحراف معیارها محاسبه شده است. مقادیر میانگین و ماکزیمم انحراف معیار در جدول ۱ نشان داده شده است. این جدول نشان می‌دهد که رفتار مشعل‌های مختلف در محدوده پایدار آن‌ها بسیار شبیه به هم است و در نواحی گذر و ناپایدار وابستگی بیشتری به شرایط آزمایش و دقت ساخت مشعل‌ها دارد. با مقایسه مقادیر ماکزیمم انحراف معیار در هر ناحیه با مقدار ماکزیمم انحراف معیار در هر مشعل (۰/۰۵۰۶۹)، ملاحظه می‌شود که مقدار ماکزیمم انحراف معیار در نواحی پایدار و ناپایدار از مقدار ماکزیمم هر مشعل کمتر است. بنابراین، در ناحیه پایدار و ناپایدار خطای نتایج در حد خطای تکرار در آزمایش است. اما در ناحیه گذر این خطا بیشتر است که ناشی از وابستگی شدید آزمایش‌ها به دقت ساخت مشعل‌ها، دقت ابزار اندازه‌گیری دبی سوخت و هوا و دقت آزمایش‌کننده است.

برای اعتبارسنجی این نتایج از نتایج به‌دست‌آمده توسط چنگ استفاده شده است [۹]. شکل ۱۱ منحنی پایداری یک مشعل کم‌پیچش با قطر ۵۰ میلی‌متر و عدد پیچش ۰/۵۵ با سوخت گاز طبیعی را نشان می‌دهد. با مقایسه این منحنی با منحنی پایداری به‌دست آمده در قسمت‌های قبل، ملاحظه می‌شود که روند کلی حد پشش و دمش همانند هم است. البته در آزمایش‌های چنگ، عدد پیچش، قطر مشعل و نوع سوخت متفاوت است. در مطالعات و مقالات پیشین ناحیه هیستریزیس برای این شعله‌ها گزارش نشده است.

جدول ۱- مقادیر میانگین و ماکزیمم انحراف معیار نسبت هم‌ارزی در نواحی مختلف منحنی پایداری مشعل‌ها

مقدار میانگین انحراف معیار	مقدار ماکزیمم انحراف معیار	
۰/۰۲۲۷۷	۰/۰۲۴۸۵	ناحیه ناپایدار
۰/۰۳۴۱۵	۰/۱۳۸۵	ناحیه گذر
۰/۰۰۹۳۷	۰/۰۲۰۶	ناحیه پایدار



شکل ۱۱- پایداری شعله حاصل از مشعل کم‌پیچش پره‌دار در عدد پیچش ۰/۵۵ با سوخت گاز طبیعی [۹]

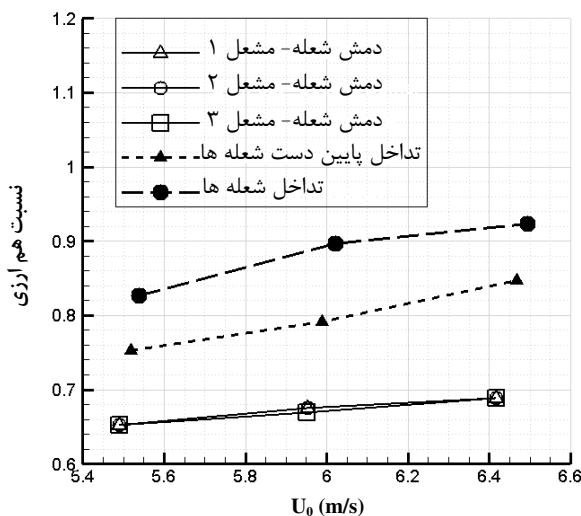
### مشخصه‌های پایداری شعله‌های کم‌پیچش حاصل از مشعل‌های هم‌جوار

در یک محفظه احتراق حلقوی چندین مشعل در کنار هم روی یک حلقه قرار می‌گیرند. در این وضعیت بررسی تداخلات شعله‌ها و تأثیر آن‌ها بر پایداری یکدیگر بسیار مهم است و با این بررسی‌ها امکان انتخاب فواصل مناسب مشعل‌ها و تعداد آن‌ها در یک محفظه احتراق فراهم می‌شود. در یک محفظه احتراق حلقوی برای اینکه راندمان محفظه احتراق افزایش یابد، تا حد امکان تعداد مشعل‌های زیادی در کنار هم قرار می‌گیرند. بنابراین بهترین آرایش قرارگیری مشعل‌های کم‌پیچش آرایشی است که در آن بیشترین مشعل در کنار هم قرار گیرد، بدون اینکه شعله‌ها ناپایدار شوند و تولید آلاینده‌ها افزایش یابد.

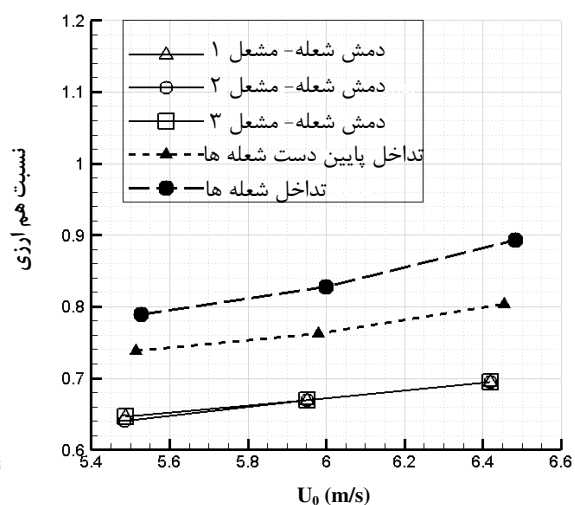
پس از شناخت رفتار سه مشعل به صورت مجزا هر سه مشعل کم‌پیچش در کنار هم قرار گرفته و پایداری شعله‌های آن‌ها بررسی شده است. هدف از انجام این آزمایش بررسی تأثیرات تداخلات شعله‌ها بر روی پایداری آن‌هاست. لذا برای این کار ناحیه کاملاً پایدار هر سه مشعل باید انتخاب شود که برای مشعل‌های مورد بررسی طبق شکل ۹ نواحی با سرعت مخلوط سوخت و هوای بیش از ۵ متر بر ثانیه مناسب است. در این ناحیه، رفتار هر سه مشعل نیز بسیار شبیه به هم است. برای این بررسی از ۳ آرایش مختلف مشعل‌ها در کنار هم استفاده شده است. این آرایش‌ها بر اساس زاویه بین مشعل‌ها تقسیم بندی می‌شوند. مشعل میانی (مشعل دوم) همواره ثابت است و مشعل راست (مشعل ۳) و مشعل چپ (مشعل ۱) در سه آرایش مختلف با زوایای ۳۶، ۴۵ و ۵۴ درجه در کنار آن قرار گرفته‌اند. با در نظر گرفتن قطر دایره جابه‌جایی و زاویه بین این سه مشعل در سه آرایش گفته شده، اندازه کمان بین مشعل دوم و مشعل‌های اول و سوم بر روی دایره جابه‌جایی به ترتیب برای سه آرایش برابر ۷۸/۵، ۹۸/۱ و ۱۱۷/۸ میلی‌متر است. مشعل‌ها در آرایش ۳۶ درجه حداقل فاصله را از هم دارند.

منحنی پایداری مشعل‌های کم‌پیچش با آرایش‌های ۳۶، ۴۵ و ۵۴ درجه در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ آمده است. محور عمودی این منحنی‌ها نسبت هم‌ارزی و محور افقی آن‌ها سرعت مخلوط سوخت و هوای خروجی از مشعل است. تمامی این آزمایش‌ها چندین بار تکرار شده‌اند و مقادیر انحراف معیار نسبت هم‌ارزی محاسبه شده است. مقدار میانگین انحراف معیار در نتایج هر سه آرایش ۰/۰۵۲۹ و مقدار ماکزیمم آن ۰/۱۹۴۶۶ است.

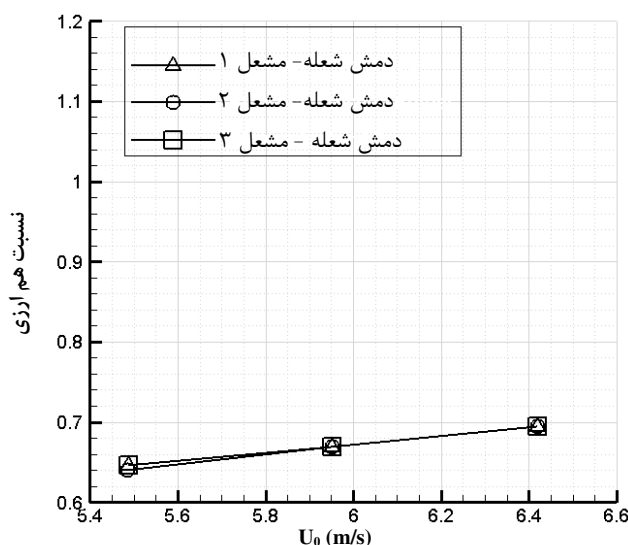
با توجه به نتایج، در نسبت هم‌ارزی‌های پایین هیچ‌گونه تداخلی بین شعله‌ها وجود ندارد. اما زمانی که مشعل‌ها به اندازه کافی به هم نزدیک‌اند (آرایش‌های ۳۶ و ۴۵ درجه)، با افزایش نسبت هم‌ارزی، تداخل شعله‌ها ابتدا از پایین دست شعله‌ها شروع شده و در نواحی پرسوخت‌تر هسته اصلی شعله‌ها با هم تداخل می‌کنند (شکل ۱۵)، زیرا با افزایش نسبت هم‌ارزی عرض و طول شعله‌ها افزایش می‌یابد (نتایج شکل‌های ۶ و ۷). این تداخل منجر به تغییر حد دمش شعله‌ها و یا پشش کردن شعله‌ها نمی‌شود.



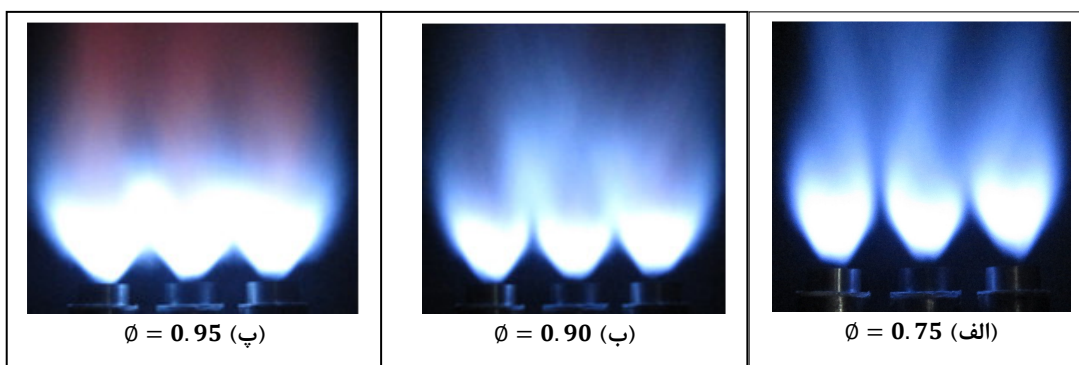
شکل ۱۳- منحنی پایداری مشعل‌ها در آرایش ۴۵ درجه



شکل ۱۲- منحنی پایداری مشعل‌ها در آرایش ۳۶ درجه



شکل ۱۴ - منحنی پایداری مشعل‌ها در آرایش ۵۴ درجه



شکل ۱۵ - تداخل شعله‌ها در آرایش ۳۶ درجه، (الف) شعله‌ها بدون تداخل، (ب) تداخل در پایین دست شعله‌ها و (پ) تداخل شعله‌ها

شایان ذکر است که تغییر حد دمشی شعله‌ها در آرایش ۴۵ درجه نسبت به نمودار ۹ و دو آرایش ۳۶ و ۵۴ درجه در محدوده انحراف معیار نسبت هم‌ارزی است. حداکثر تغییر نسبت هم‌ارزی در این حالت ۰/۰۱۲۴۹ است که در محدوده انحراف معیار ذکر شده در بالاست. بنابراین، این تغییر در حد خطای اندازه‌گیری است و فاقد توجیه فیزیکی است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که با افزایش سرعت، تداخل شعله‌ها در نسبت هم‌ارزی‌های بیشتری اتفاق می‌افتد. زیرا با افزایش سرعت در یک نسبت هم‌ارزی خاص طول و عرض شعله‌ها کاهش می‌یابد (نتایج شکل‌های ۶ و ۷). بنابراین، مشخصه‌های پایداری شعله‌های کم‌پیچش پایدار مستقل از چیدمان مشعل‌هاست و با کاهش فاصله بین مشعل‌ها تنها تداخلاتی بین شعله‌ها صورت می‌گیرد.

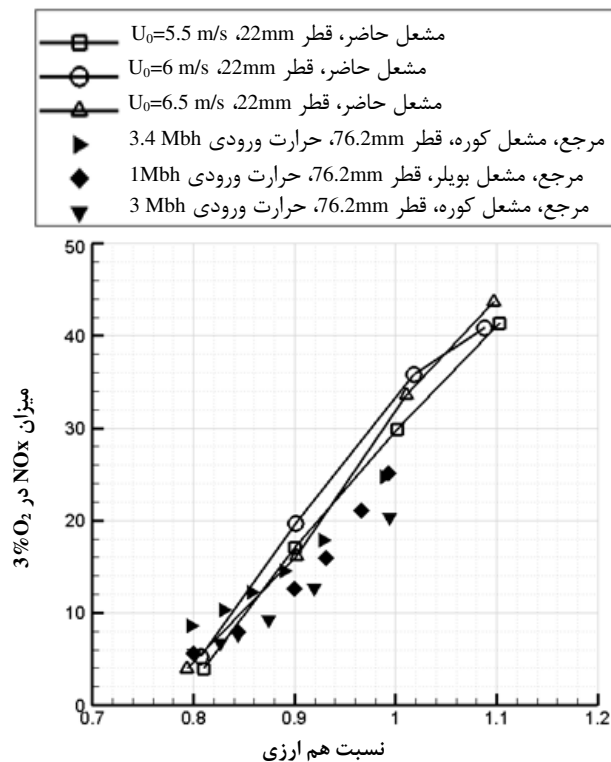
### تولید آلاینده NO<sub>x</sub> یک مشعل مجزا

مشعل‌های کم‌پیچش معمولاً در کاربردهای مختلف در شرایطی مورد استفاده قرار می‌گیرند که شعله‌ای پایدار تولید کنند. بنابراین، تولید آلاینده‌های این نوع مشعل‌ها باید در این شرایط بررسی شود. به همین دلیل، در این قسمت آلاینده NO<sub>x</sub> شعله‌های حاصل از این مشعل‌ها در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف و در سه سرعت مخلوط سوخت و هوای خروجی از مشعل ۵/۵، ۶ و ۶/۵ متر بر ثانیه انجام شده است. نتایج حاصل از این بررسی‌ها در آزمایش‌های مختلف با میزان اکسیژن برابری در

محصولات همراه نبوده است. برای مقایسه تولید  $\text{NO}_x$  در نسبت هم‌ارزی‌ها و سرعت‌های مخلوط سوخت و هوای مختلف، باید میزان درصد اکسیژن تمامی آزمایش‌ها یکسان باشند. بنابراین، میزان تولید  $\text{NO}_x$  با توجه به رابطه زیر برای ۳ درصد حضور اکسیژن تصحیح شده است.

$$\text{NO}_x \left( \text{Corrected to } 3\% \text{ O}_2 \right) = \text{NO}_x \left( \text{Measured} \right) \times \frac{1 - 3\% / 20.9}{1 - \text{O}_2\% / 20.9} \quad (2)$$

به منظور مقایسه روند تغییر تولید  $\text{NO}_x$  بر حسب نسبت هم‌ارزی، نتایج به دست آمده به همراه نتایج مرجع [۱]، که برای مشعل‌ها با قطرهای ۳ و ۵ اینچ در محفظه احتراق‌های دیگ بخار و کوره مختلف ارائه شده است، در شکل ۱۶ نشان داده شده است. از آنجا که رفتار هر سه مشعل در ناحیه پایدار یکسان است (بر اساس نتیجه شکل ۹)، بنابراین نتایج مربوط به یکی از مشعل‌ها در این قسمت ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد تولید  $\text{NO}_x$  در محدوده کم سوخت (نسبت هم‌ارزی کمتر از ۱) کمتر از ۳۰ ppm است.

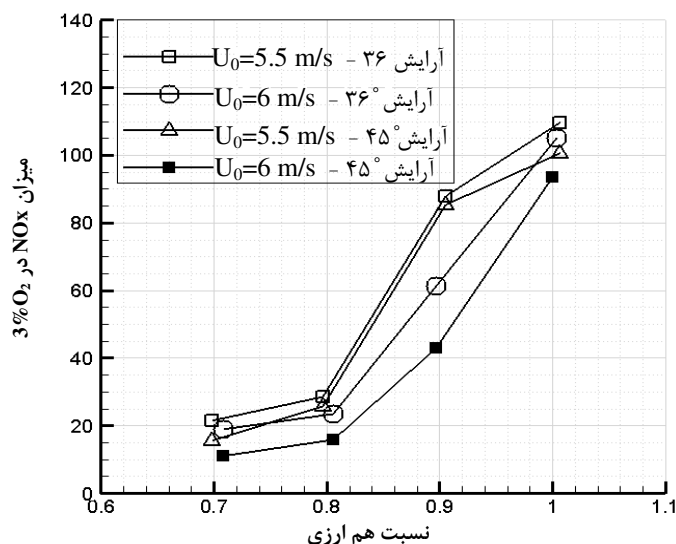


شکل ۱۶- تولید آلاینده  $\text{NO}_x$  مشعل کم‌پیچش در ناحیه پایدار مشعل

با توجه به نتایج ملاحظه می‌شود که با افزایش نسبت هم‌ارزی تولید  $\text{NO}_x$  افزایش می‌یابد. همچنین با مقایسه نمودارهای مربوط به تولید  $\text{NO}_x$  در سرعت‌های مختلف مخلوط سوخت و هوای خروجی از مشعل، می‌توان دریافت که تغییر سرعت تأثیر ناچیزی بر تولید  $\text{NO}_x$  دارد. محاسبات انحراف معیار داده‌ها (مقادیر  $\text{NO}_x$  در سرعت‌های مختلف و نسبت هم‌ارزی‌های یکسان) نشان می‌دهد که تغییرات تولید  $\text{NO}_x$  در سرعت‌های مختلف از خطای ابزار اندازه‌گیری کمتر است. مقدار میانگین انحراف معیار  $\text{NO}_x = 0.48$  ppm و مقدار ماکزیمم آن  $\text{NO}_x = 0.81$  ppm است.

## تولید آلاینده $NO_x$ حاصل از مشعل‌های هم‌جوار

در محفظه احتراق‌ها، معمولاً سعی بر آن است که میدان احتراقی و دمایی در مقطع عرضی محفظه یکنواخت باشد. برای این منظور، معمولاً از تعداد زیادی مشعل در یک محفظه احتراق حلقوی استفاده می‌شود. بنابراین، آرایش ۵۴ درجه برای کاربردهای عملی غیرقابل استفاده است. در این قسمت تولید آلاینده  $NO_x$  شعله‌های حاصل از سه مشعل هم‌جوار در دو آرایش ۳۶ و ۴۵ درجه و دو سرعت نمونه ۵/۵ و ۶ متر بر ثانیه ارائه شده است (شکل ۱۷).



شکل ۱۷- تولید آلاینده  $NO_x$  مشعل‌های کم پیچش هم‌جوار در ناحیه پایدار

با توجه به این نتایج، ملاحظه می‌شود که با افزایش سرعت مخلوط سوخت و هوا در نسبت هم‌ارزی‌های ثابت، تولید آلاینده  $NO_x$  کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش سرعت، با توجه به نتایج شکل‌های ۶ و ۷، طول و عرض شعله کاهش می‌یابد، بنابراین، شعله‌ها با هم تداخل کمتری پیدا می‌کنند. افزایش تداخلات شعله‌ها باعث می‌شود که ناحیه شعله افزایش یافته و با افزایش دما میزان تولید  $NO_x$  افزایش یابد. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که در یک شرایط خاص از نسبت هم‌ارزی و سرعت مخلوط سوخت و هوا تولید  $NO_x$  شعله‌ها در آرایش ۴۵ درجه کمتر از آرایش ۳۶ درجه مشعل‌هاست، زیرا تداخلات شعله‌ها در آرایش ۴۵ درجه، به علت دور شدن مشعل‌ها از هم، کمتر است. شکل ۱۷ همچنین نشان می‌دهد که با افزایش نسبت هم‌ارزی بیش از ۰/۸ تولید  $NO_x$  به یکباره افزایش می‌یابد، زیرا با توجه به نتایج شکل‌های ۱۲ و ۱۳ در این نسبت هم‌ارزی‌ها شعله‌ها با هم تداخل می‌کند.

## نتیجه‌گیری

نتایج مطالعه تجربی حاضر نشان می‌دهد که پایداری شعله‌های کم‌پیچش بسیار وابسته به سرعت مخلوط سوخت و هوای خروجی از مشعل است. در سرعت‌های مخلوط سوخت و هوای پایین، شعله ناپایدار است، اما با افزایش سرعت، شعله پایدار می‌شود. در ناحیه‌ای بین شعله پایدار و ناپایدار رفتار شعله وابسته به نسبت هم‌ارزی و مسیری است که شعله مورد نظر ایجاد می‌شود. ناحیه‌ای که در آن پشش شعله، دمش شعله و یا هر دو می‌تواند اتفاق بیفتد را ناحیه هیستریزیس شعله می‌نامیم. این ناحیه در مطالعات پیشین برای این شعله‌ها گزارش نشده است. بررسی تولید آلاینده  $NO_x$  این شعله‌ها نشان می‌دهد که شعله‌های کم‌پیچش آلاینده بسیار کمی تولید می‌کنند و تغییر در سرعت مخلوط سوخت و هوای خروجی از مشعل بر میزان

تولید  $\text{NO}_x$  شعله حاصل از یک مشعل کم‌پیچش بی‌تأثیر است. شکل شعله کم‌پیچش پایدار وابستگی زیادی به نسبت هم‌ارزی و سرعت مخلوط سوخت و هوای خروجی از مشعل دارد، به طوری که با افزایش نسبت هم‌ارزی و یا کاهش سرعت مخلوط سوخت و هوا، عرض و طول شعله افزایش یافته و ارتفاع جدایش شعله از لبه مشعل کم می‌شود. بررسی چند مشعل کم‌پیچش در ناحیه عملکردی، که هر یک شعله پایدار تولید می‌کنند، در کنار هم با آرایش‌های مختلف نشان می‌دهد که قرارگیری مشعل‌ها در شرایطی که هر یک به‌صورت مجزا شعله‌ای پایدار تولید می‌کنند، در هر فاصله‌ای از یکدیگر بر مشخصه‌های پایداری شعله‌های حاصل تأثیری ندارد. تولید آلاینده  $\text{NO}_x$  در این حالت، به‌علت افزایش تداخلات شعله‌ها، افزایش می‌یابد.

## تشکر و قدردانی

با تشکر و قدردانی از جناب مهندس ایوب عادل و تمامی همکاران محترم ایشان در شرکت شعله صنعت که ما را در ساخت و راه‌اندازی سیستم تجربی همیاری نمودند.

## منابع

1. D. Dunn-Rankin, *Lean Combustion: Technology and Control*, London, Academic Press, 2008.
2. N. Syred, and J. M. Beer, "Combustion in Swirling Flows: A Review," *Combustion and Flame*, 123, pp. 143-201, 1974.
3. R. K. Cheng, D. T. Yegian, M. M. Miyasato, G. S. Samuelsen, C. E. Benson, R. Pellizzari and P. Loftus, "Scaling and Development of Low-Swirl Burners for Low-Emission Furnaces and Boilers," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, pp. 1305-1313, 2000.
4. Y. Huang, and V. Yang, "Dynamics and Stability of Lean-Premixed Swirl-Stabilized Combustion," *Journal of Progress in Energy and Science*, 35, pp. 293-364, 2009.
5. M. R. Johnson, D. Littlejohn, W. A. Nazeer, K. O. Smith, and R. K. Cheng, "A Comparison of the Flowfields and Emissions of High-Swirl Injectors and Low-Swirl Injectors for Lean Premixed Gas Turbines," *Symp. (Int.) Combust.*, 30, pp. 2867-2874, 2005.
6. R. K. Cheng, "Velocity and Scalar Characteristics of Premixed Turbulent Flames Stabilized by Weak Swirl," *Combustion and Flame*, 101, pp. 1-14, 1995.
7. D. Dunn-Rankin, *Lean Combustion Technology and Control*, USA Elsevier, USA, 2008.
8. D. T. Yegian and R. K. Cheng, "Development of a Lean Premixed low-Swirl Burner for Low  $\text{NO}_x$  Practical Application," *Combustion Science and Technology*, 139, pp. 207-227, 1998.
9. D. T. Yegian and R. K. Cheng, "Development of a Vane-Swirl for Use in a Low  $\text{NO}_x$  Weak-Swirl Burner," Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA, Tech. Rep. LBNL 39354, 1996.
10. R. K. Cheng, "Velocity and Scalar Characteristics of Premixed Turbulent Flames Stabilized by Weak Swirl," *Combustion and Flame*, 101, pp. 1-14, 1995.
11. R. K. Cheng and D. Littlejohn, "Effects of Combustor Geometry on the Flowfields and Flame Properties of a Low-Swirl Injector," *Proceedings of ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air*, Berlin, Germany, 2008.
12. M. Legrand, J. Nogueira, A. Lecuona, S. Nauri, and P. Rodriguez, "Atmospheric Low Swirl Burner Flow Characterization with Stereo PIV," *Exp. Fluids*, 48, pp. 901-913, 2010.
13. D. Sequera and A. Agrawal, "Emissions and Acoustics Measurements in a Low-Swirl Burner," *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, 2007.
14. M. Shahsavari, and M. Farschi, "Influence of a Vane Swirl Burner Characteristics on Stability Characteristics of the Low Swirl Flame", *10th Aerospace Industries Organization Conference*, Tehran, Iran, 2010 (In Farsi).



## English Abstract

# Stability Characteristics and NO<sub>x</sub> Emissions of Low Swirl Flames

M. Shahsavari and M. Farshchi

Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 2012.9.12, Received in revised form: 2013.2.6, Accepted: 2013.2.14)

*Low swirl combustion is an innovative method for stabilizing lean premixed flames. Understanding the stability characteristics and NO<sub>x</sub> emissions of low swirl flames as well as influence of interaction of several low swirl flames on stability characteristic and NO<sub>x</sub> emissions are necessary to make low swirl burners applicable to various combustion chambers. The primary objectives of this study are to assess flame stability characteristics and NO<sub>x</sub> emissions of vane swirl burners. Since in an annular combustor several burners are mounted next to each other, the influence of flames interactions on the stability and NO<sub>x</sub> emissions of low swirl flames are examined. The data show that the stability of low swirl flames is highly dependent on the fuel-air mixture velocity at the burner exit, the mixture equivalence ratio, and the fuel-air feeding strategy to achieve the desired flame. NO<sub>x</sub> emissions of a low swirl flame are insensitive to the the fuel-air mixture velocity at the burner exit at a given equivalence ratio, but they are directly proportional to the equivalence ratio. Individual burner stability is maintained when they are arranged in any annular formation. Although flames interactions have no influence on the overall flame stability characteristics but they increase NO<sub>x</sub> emissions.*

**Keywords:** Low swirl flame, Stability characteristics, NO<sub>x</sub>, Low swirl flames interactions