

بررسی تجربی مشعل کم‌پیچش با پیش‌مخلوط رقیق برای کاهش آلاینده‌ها

محمد فرشچی^{۱*}، نورالدین توحیدی^۲

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

برای انجام آزمایشات تجربی، مشعل کم‌پیچش با مشخصات فنی خاص طراحی و ساخته شده که در آن، با تغییر پارامترهای اصلی شعله از قبیل عدد پیچش هندسی، نسبت تعادل و دبی جرمی مخلوط سوخت و هوا، روی میزان آلاینده‌ها؛ مانند مونوکسید نیتروژن و مونوکسید کربن، و محدوده پایداری شعله از قبیل؛ دمش و پش بحث و مطالعه شده است. در مشاهدات تجربی با افزایش میزان جریان پیچشی از ۰/۴۸ به ۰/۵۵ در محدوده رقیق از شدت میزان آلاینده‌ها کاسته، ولی در محدوده استوکیومتریکی میزان آلاینده‌ها افزایش می‌یابد. همچنین، در محدوده جریان‌های کم-پیچش مشاهده شده که با افزایش عدد پیچش، میزان رقیق‌سازی شعله بیشتر می‌شود. مشعل کم‌پیچش، شعله‌ای معلق و پایدار تولید کرده که ابزار مناسب و کم هزینه‌ای برای کاهش آلاینده‌ها و صرفه‌جویی اقتصادی مطرح می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مشعل کم‌پیچش- احتراق پیش مخلوط رقیق- کاهش آلاینده‌ها- NO_x ناکس

۱- مقدمه

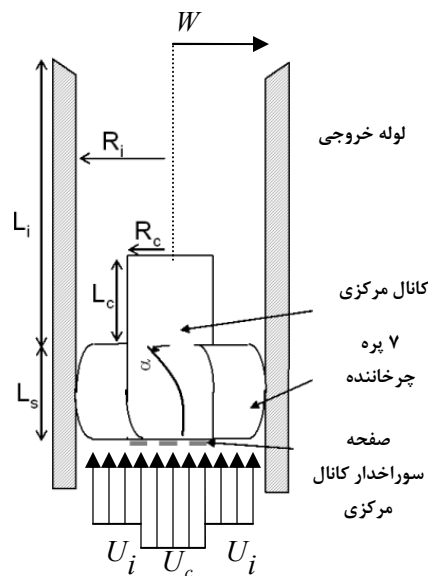
طبق گزارشات آژانس انرژی بین‌المللی در سال ۲۰۰۶، حدود ۸۱ درصد از انرژی روی کره زمین از طریق احتراق سوخت‌های فسیلی بدست می‌آید، به طوری که ۲۱ درصد از گاز طبیعی، ۳۵ درصد از نفت و ۲۵ درصد از زغال سنگ تأمین می‌شوند [۱]. در سالیان اخیر مصرف سوخت‌های فسیلی و در پی آن آلودگی‌های زیست محیطی به صورت قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. در این شرایط افزایش کارایی احتراق سیستم‌های مرتبط باعث صرف‌جویی در مصرف سوخت و همچنین کاهش آلاینده‌ها می‌شود که تحقیقات جدید بر روی این رویکرد متمرکز شده است. آلاینده‌های اصلی حاصل از احتراق هیدروکربن‌های نسوخته، اکسید نیتروژن، مونوکسید کربن، اکسید سولفور، دوده و ذرات ریز یا خاکستر می‌باشند. در کشور ما نیز با توجه به گستردگی تولید انرژی الکتریکی از طریق نیروگاه‌های حرارتی (سوخت فسیلی)، این موضوع بعنوان یک چالش اساسی در صنعت برق مطرح می‌شود. برای کاهش آلاینده‌های ناشی از احتراق از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که از آن جمله می‌توان به روش پاشش آب یا بخار پس از احتراق، اشاره داشت که مشخصاً استفاده از حالت نخست می‌تواند تا حدود ۶۰٪ از میزان NO_x محصولات احتراق بکاهد [۲].

یکی دیگر از روش‌های کاهش NO_x ، استفاده از مشعل‌های کم‌پیچش می‌باشد، که توسط چنگ و همکارانش ابداع شده است [۳]. ایده این روش آن است که یک موج با سرعت زیاد، شعله پیش مخلوط آشفته را به صورت یک موج ایستا در بیاورد. برای دستیابی به قوانین زیست محیطی تولید آلاینده‌ها، ساختار احتراق کم‌پیچش ساختاری مناسب تر و ایده‌آل‌تری نسبت به ساختار احتراق پرپیچش در محفظه احتراق‌های توربین گازی است [۴-۶]. شماتیک مشعل کم‌پیچش در شکل ۱ نمایش داده شده‌است. برای دستیابی به میزان NO_x پایین می‌توان با استفاده از روش احتراق پیش‌مخلوط رقیق تا حد امکان دمای شعله را

۱- استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف؛ farshchi@sharif.edu

۲- کارشناس ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف؛ nortohidi@alum.sharif.edu

کاهش داد. در احتراق پر پیچش در اثر پیچش زیاد نیروهای گریز از مرکز شدیدی ایجاد می‌شود که این نیروها باعث ایجاد گرادیان‌های فشار قوی می‌شوند، در اثر ایجاد این گرادیان‌های فشاری قوی پدیده‌ای در جریان رخ می‌دهد که در پی آن جریان دچار شکست می‌شود. شکست جریان ایجاد ناحیه‌ای برگشتی می‌کند. ناحیه برگشتی باعث پایداری شعله و برخورد تولیدات داغ احتراقی با واکنش دهنده‌های سرد برای تقویت واکنش‌ها می‌شود [۷-۹]. اگرچه، سیستم‌های احتراق پر پیچش به میزان آلاینده‌های پایین دست یافته‌اند، ولی عملکرد آن در محدوده دمش برای ایجاد شعله استاتیک و دینامیک کار بسیار سختی می‌باشد. در حالی که، با تعبیه صفحه سوراخدار در مرکز مشعل‌های کم‌پیچش از میزان قدرت پیچش کاسته و یک شعله خیلی پایدار با میزان انتشار آلاینده‌های خیلی پایین همچون CO و NO_x تولید می‌شود [۴-۶]. اساس عملکرد مشعل کم‌پیچش تولید شعله معلق با استفاده از جریان واگرای ایجاد شده در خروجی آن بوده، به طوریکه، سرعت توربولانس شعله پیش‌مخلوط با سرعت جریان محلی برابر شود. شعله پس‌زده نمی‌شود چون، سرعت توربولانس شعله کمتر از سرعت جریان خروجی از گلوگاه مشعل بوده و شعله دمیده نمی‌شود زیرا، سرعت توربولانس شعله بیش از سرعت جریان پایین دست شعله می‌باشد. میدان جریان و آلاینده‌های حاصل از احتراق پیچشی برای شرایط مختلف ورودی تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. در این مطالعات، با طراحی و ساخت یک مشعل کم‌پیچش، تاثیر پارامترهایی مانند عدد پیچش و نسبت اختلاط بر روی عملکرد شعله و انتشار آلاینده‌ها مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱- نمای مشعل پیچشی از نوع پره

۲- معادلات حاکم

در طراحی مشعل‌های پیچشی، پارامترهای زیادی مطرح است. یکی از مهمترین این پارامترها که به نوعی بیان‌کننده نوع مشعل بوده، عدد پیچش است. عمومی‌ترین تعریف ممکن از عدد پیچش، S ، یک مقیاس بی‌بعد از شدت پیچش بوده که توسط چگیری و بیر [۱۰] بیان شده است،

$$S = \frac{G_{ang}}{G_x \cdot R} \quad (1)$$

که در آن، R ، شعاع گلوگاه مشعل، G_{ang} ، شار محوری حاصل از مومنتم زاویه و G_x ، شار محوری حاصل از مومنتم محوری است. عدد پیچشی را می توان براساس انتگرال میدان سرعت نیز بدست آورد [۱۱]. به علت اینکه معمولاً کمیت های سرعت به راحتی در دسترس نمی باشند این رابطه یک رابطه مهندسی مناسب نیست. بنابراین، برای کاربردهای مهندسی از یک تعریف عدد پیچش براساس پارامترهای هندسی مشعل استفاده می شود. به طور کلی، مناسب ترین تعریف عدد پیچشی هندسی، S_g ، بوده که براساس اندازه گیری جریان ها یا شرایط ورودی و هندسه مشعل می باشد. در اینجا، پره ها موجب ایجاد جریان پیچشی مطابق شکل ۱ می شوند.

با فرض یکنواخت بودن جریان محوری، زاویه پره α ، با مؤلفه های سرعت U و W در دهانه خروجی مشعل رابطه $tg \alpha = W/U$ دارد. شار محوری حاصل از مومنتم زاویه ای بصورت زیر تعریف می شود [۱۱]:

$$G_{ang} = 2\pi\rho \int_{R_c}^{R_i} U_i(U_i \tan \alpha) r^2 dr$$

$$= 2\pi\rho U_i^2 \tan \alpha \left(\frac{R_i^3 - R_c^3}{3} \right) \quad (2)$$

در این رابطه، U_i ، متوسط سرعت محوری حاصل از پیچش توسط پره ها است. با فرض توزیع جریان یکنواخت، شار مومنتم خطی حاصل از دو قسمت مرکزی و پیچشی به صورت زیر محاسبه می شوند؛

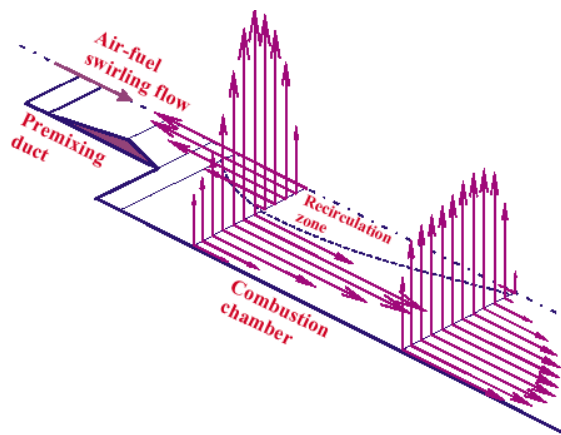
$$G_x = 2\pi\rho \int_{R_c}^{R_i} U_i^2 r dr + 2\pi\rho \int_0^{R_c} U_c^2 r dr$$

$$= \pi \left[\rho U_i^2 (R_i^2 - R_c^2) + \rho U_c^2 R_c^2 \right] \quad (3)$$

در آن، U_c ، متوسط سرعت محوری که توسط هسته مرکزی ایجاد می شود. با استفاده از معادله ۱ تا ۳ می توان عدد پیچش هندسی را برای مشعل پیچشی از نوع پره ای به صورت زیر تعریف کرد،

$$S_g = \frac{2}{3} \tan \alpha \frac{1 - R^3}{1 - R^2 + \left[m^2 \left(\frac{1}{R^2} - 1 \right) \right]^2 R^2} \quad (4)$$

که در این رابطه، R ، نسبت شعاع مرکزی به شعاع مشعل $R = R_c/R_i$ است. برای ساده سازی بیشتر معادله، نسبت شار جرمی $m = \dot{m}_c/\dot{m}_i$ بیان شده که $\dot{m}_c$ برای ناحیه مرکزی و $\dot{m}_i$ برای ناحیه حلقوی تعریف می شود. نسبت شار جرمی مشابه نسبت سطح مؤثر از هسته مرکزی و پیچشی می باشد.



شکل ۲- توزیع مؤلفه‌های سرعت محوری و دورانی در خروجی یک مشعل

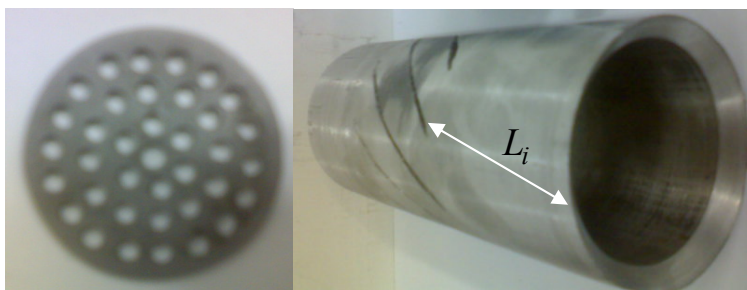
مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که بالا بودن سرعت دورانی در جریانهای پیچشی، باعث ایجاد نواحی کم فشار در مرکز جریان و در نتیجه کاهش سرعت محوری شده که این موضوع با افزایش شدت پیچش، حتی منجر به باعث بازگشت جریان نیز می‌گردد. این رفتار بصورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است. همانگونه که از این شکل ملاحظه می‌شود، با استهلاک شدت پیچش در پائین دست جریان که ناشی از تلفات اصطکاکی و همچنین پخش ممنتوم دورانی در محیط آزاد می‌باشد، ناحیه برگشتی به تدریج محو می‌گردد.

۳- شاخص‌های تجربی

مجموعه سیستم تجربی از یک مشعل کم پیچش به قطر ۲۲ میلی‌متر و طول ۷۰ میلی‌متر در داخل محفظه سیلندر شکل به قطر ۱۳۰ میلی‌متر و طول ۳۰۰ میلی‌متر در فشار اتمسفریک تعبیه شده است. سوخت و هوا به طور پیش مخلوط توسط لوله‌ای استوانه به قطر ۲۲ میلی‌متر و طول ۴۲۰ میلی‌متر به مشعل منتقل می‌شود. برای ایجاد پروفیل‌های سرعت یکنواخت و اختلاط بهتر پیش مخلوط تعدادی توری مناسب در طول لوله قبل از ورود به مشعل قرار داده شده است. هوای مورد نیاز برای احتراق از طریق کمپرسور تامین و به وسیله نازل صوتی اندازه‌گیری می‌شود. در اینجا با اندازه‌گیری فشار استاتیک قبل از نازل صوتی و سطح مقطع می‌توان مقدار هوای مورد نیاز را با استفاده از روابط حاکم محاسبه نمود. گاز پروپان و متان از طریق کپسول پرفشار با تعبیه رگلاتور در مسیر جریان، مقدار دبی گاز کنترل می‌شود. میزان سوخت مورد نیاز توسط روماتر مدل پی.ام.ای.آی^۱ با دقت حدود ۰.۲٪ که توسط شرکت سازنده کالیبره شده اندازه‌گیری می‌شود.

مشعل‌های کم پیچش، پیش مخلوط سوخت و هوا را از دو مجرای مرکزی و پیچشی مطابق شکل ۱ عبور می‌دهد. با عبور واکنش دهنده‌ها از صفحه سوراخدار واقع در کانال مرکزی یک جریان یکنواخت و ایزوتروپ در پایین دست تولید می‌شود که این جریان یکنواخت با جریان پیچشی حاصل از پره‌ها در پایین دست برخورد می‌کند، به طوریکه، حرکت پیچشی حاصل به مرکز جریان نفوذ نمی‌کند. قسمت چرخاننده از ۷ عدد پره صاف تشکیل شده که کانال مرکزی را احاطه می‌کنند. ناحیه چرخاننده باعث ایجاد یک جریان پیچشی می‌شود که جریان مرکزی بدون پیچش را محاصره می‌کند. پره‌های صاف نسبت به محور مرکزی مشعل هم تراز شده و نسبت به آن زاویه ۳۷ درجه دارد، نسبت قطر کانال مرکزی به کانال پیچشی حدود ۰.۵۶ در نظر گرفته شده است. در این آزمایش، صفحه سوراخدار از سوراخهای دایروی به قطر ۲.۵ میلی‌متر مطابق سمت چپ شکل ۳ ساخته شده و به صورت دایروی نسبت به مرکز با انسداد ۰.۴۸٪ و ۰.۶۵٪ چیده شده‌اند.

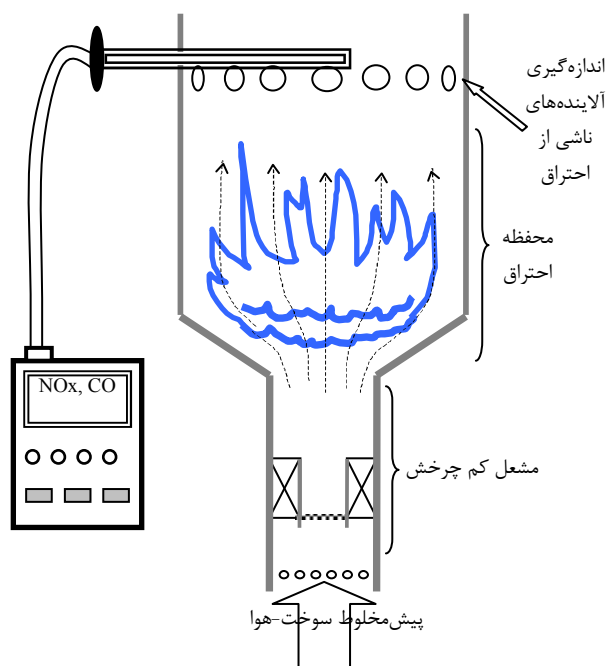
^۱ PM-A-I



شکل ۳- نمای صفحه سوراخدار توربولانس کننده به همراه مشعل

یکی از پارامترهای مهم در طراحی مشعل کم پیچش در شکل ۳ سمت راست، طول ناحیه بعد از پره‌ها است. زیرا، این طول روی مدت زمان برخورد مماسی جریان پیچشی با جریان بدون پیچش مؤثر می‌باشد. طول لوله خروجی مشعل در موقعیت تعادلی شعله تأثیر می‌گذارد، به طوری که، افزایش طول لوله آن موجب افزایش ارتفاع شعله خواهد شد. زیرا سرعت جریان محوری زیاد و شدت آشفتگی آن کاهش یافته و این دو عامل در افزایش ارتفاع شعله دخیل می‌باشند.

گازهای سوخته به طور پیوسته از طریق پراپ گاز آنالیزور مدل لنکام تری مطابق شکل ۴ نمونه‌برداری می‌شوند. به دلیل داغ بودن تولیدات احتراقی در اطراف شعله و فرصت برای احتراق کامل، با گسترش محفظه در فاصله ۶۰۰ میلی‌متری از دهانه خروجی مشعل نمونه برداری توسط پراپ گاز آنالیزور انجام می‌شود. میزان آلاینده‌های NO_x و CO از طریق الکتروود شیمیایی به روش نمونه‌برداری خشک با دقت ± 2 پی‌پی‌ام و مقدار O_2 با دقت $\pm 0.1\%$ توسط گاز آنالیزور محاسبه شده‌اند. پروفیل آلاینده‌های خشک با ضریب تصحیح 1.5% O_2 در قسمت نتایج نشان داده شده است.



شکل ۴- شماتیک نحوه اندازه‌گیری آلاینده‌ها

۴- بحث و نتایج تجربی

۴-۱- جدایش شعله از لبه مشعل (شعله معلق)

در شعله‌های پیش مخلوط، جبهه شعله به صورت یک موج به سمت پیش مخلوط سوخت و هوا حرکت می کند. سرعت شعله به وسیله نسبت معادل، شرایط ترمودینامیکی و شدت توربولانس کنترل می شود. در مقابل شعله‌های پیش مخلوط، شعله های دیفیوژن وجود دارند که به صورت آزادانه منتشر نمی شوند، زیرا در شعله های دیفیوژن عمل سوزش در ناحیه اختلاط سوخت و اکسید کننده اتفاق می افتد. شیوه احتراق کم پیچش رفتار موجی شعله‌های پیش مخلوط آشفته را بکار گرفته و فقط برای احتراق پیش مخلوط صادق است. این پدیده توسط شعله های پیش مخلوط در میدان جریان واگرای حاصل از جریان پیچش ضعیف به وجود می آید.

میزان پیچش بیش از حد مورد نیاز سبب پیدایش گردابه های برگشتی شده که این موجب جریان معکوس و برگشت قوی می شود. انبساط جریان در راستای شعاعی موجب کاهش خطی سرعت متوسط محوری می شود. این کاهش سرعت به سمت جریان پایین دست، نقش کلیدی در انتشار آزادانه شعله پیش مخلوط آشفته داشته و شعله را در موقعیتی ساکن کرده که سرعت جریان محلی مساوی و مخالف با سرعت شعله باشد. در این شرایط، شعله به سمت بالادست جریان حرکت نمی کند، چون سرعت جریان واکنش دهنده ها بیشتر از سرعت شعله است. همچنین شعله دمیده نمی شود، زیرا سرعت جریان پایین دست به دلیل وجود جریان واگرا کمتر از سرعت شعله است. لذا یک مکانیزم خود تنظیم برای ایستادگی شعله در برابر ناپایداری ها و تغییرات لحظه ای وجود دارد. خروج جریان از دهانه انتهایی مشعل سبب ایجاد جریان واگرا خواهد شد. در داخل این جریان پیچشی یک ناحیه بدون پیچش وجود داشته که سرعت آن به سمت پایین دست جریان کم شده و باعث جدایش شعله از لبه مشعل می شود. در اینجا، یک شعله با سرعت اولیه جریان خروجی از مشعل برابر ۴ متر بر ثانیه و نسبت اختلاط ۰/۸ مطابق شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵- نمایی از شعله معلق مربوط به نتایج حاصل از آزمایشات (جدایش شعله از لبه مشعل کم پیچش)

۲-۴- دمای بدنه مشعل

در ادامه آزمایشات احتراقی مشخص شد که دمای بدنه مشعل برای حالت با جدایش و بدون جدایش شعله از لبه مشعل قابل قیاس می‌باشند. از آنجا که، برای مدت زمان معین در حین احتراق، دمای بدنه مشعل به وسیله ترموکوپل تیپ کا با دقت حدود یک درجه سلسیوس اندازه‌گیری شده است. طبق این آزمایش مشاهده شده که دمای بدنه مشعل در حالت جدایش کامل شعله از لبه آن حدود ۴۱ درجه سلسیوس بوده، در حالی که، دمای بدنه آن در حالت بدون جدایش شعله تقریباً ۳۷۴ درجه سلسیوس می‌باشد (جدول ۱). لذا، از مزیت‌های مشعل کم پیچش، نبود تنش دمایی خاص روی دیواره‌های آن است و می‌توان مشعل مورد نظر را از جنس ارزان قیمت و سبک مثل پلاستیک یا پی.وی.سی تهیه کرد. روش مورد نظر موجب صرفه-جویی اقتصادی خواهد شد.

جدول ۱- مقایسه‌ای مقدار دمای بدنه مشعل در حین احتراق

نوع مشعل (عدد پیچش)	زمان احتراق (ثانیه)	دمای بدنه مشعل (بر حسب سلسیوس)
بدون پیچش $S=0$	۹۰۰	۴۱
کم پیچش $S=0/55$	۹۰۰	۳۷۴

۳-۴- محدوده پایداری

نقش محدوده پایداری شعله از قبیل دمش^۱ و پشش^۲ برای مشعل‌های پیچشی قابل توجه بوده که این محدوده برای صفحه-هایی با نسبت انسدادهای مختلف بدست آورده شده است. این عمل موجب تغییر عدد پیچش هندسی مشعل مورد نظر خواهد شد. همچنین، نسبت اختلاط و دبی کل جریان خروجی از مشعل (سرعت اولیه جریان) روی موقعیت شعله تاثیرگذار می‌باشند. بنابراین، پارامترهای مانند نسبت اختلاط، دبی کل جریان و عدد پیچش هندسی قابل بحث و بررسی هستند. در بررسی‌های تجربی مشعل در عدد پیچش‌های مختلف به دلیل دشوار بودن تغییر نسبت قطر یا زاویه پره، از تکنیک متفاوتی استفاده می‌شود. در این تکنیک ها، از صفحه‌های سوراخدار با انسداد ۰/۴۸٪، ۰/۶۵٪ استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که برای محاسبه مقدار عدد پیچش از معادله ۴ استفاده شده است. در آن، نسبت شعاع $R=0/56$ ، زاویه پره $\alpha=37$ ثابت بوده و با تغییر نسبت انسداد یا نسبت جرمی m ، مقدار عدد پیچش هندسی، S_g عوض می‌شود.

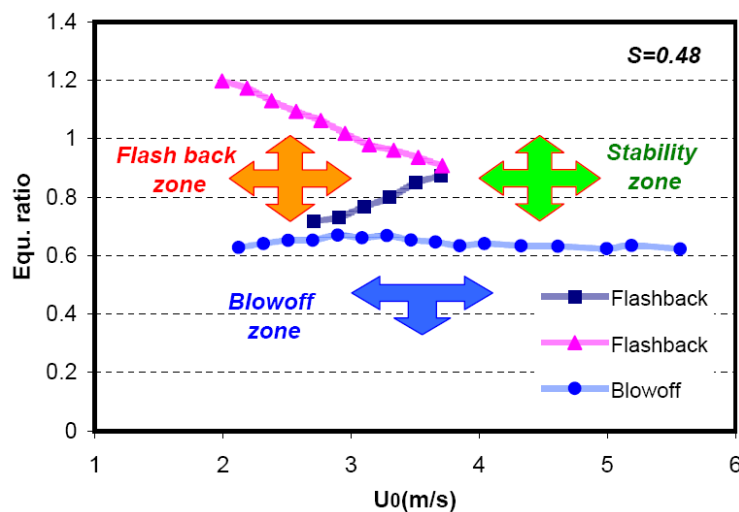
جدول ۲- مقادیر عدد پیچش هندسی برای مشعل‌های مختلف.

نوع مشعل	نسبت انسداد	عدد پیچش هندسی
A	۰/۴۸٪	۰/۴۸
B	۰/۶۵٪	۰/۵۵

در اینجا، برای انجام آزمایشات از دو نوع مشعل کم پیچش A و B مطابق جدول ۲ استفاده شده است. برای به‌دست آوردن محدوده‌های پایداری برای هر نوع مشعل، باید پارامترهای مانند دبی کل جریان و نسبت اختلاط برای عدد پیچش ثابت تغییر داد تا بتوان محدوده پایداری شعله را مشخص کرد.

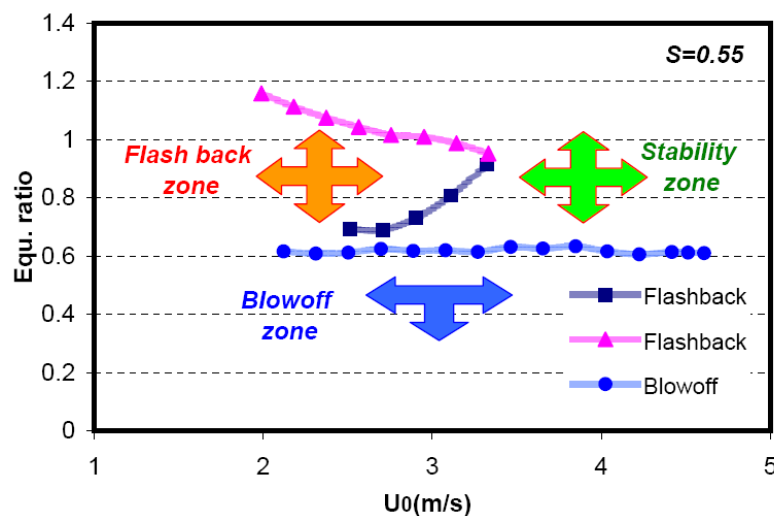
¹ Blowout

² Flashback

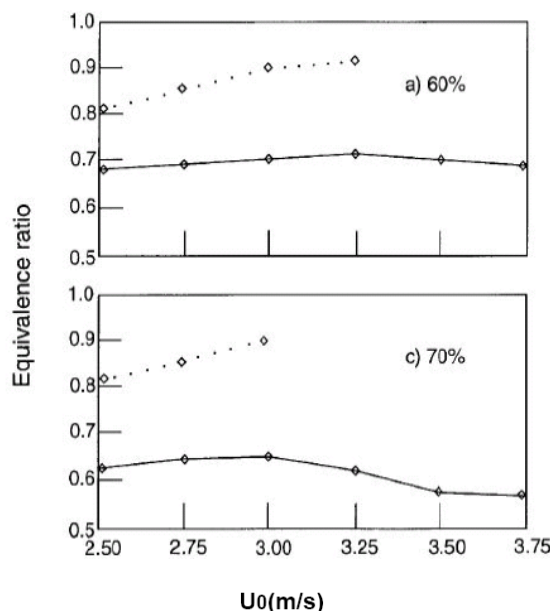


شکل ۶- محدوده دمشی و پیش برای مشعل A

با توجه به نتایج آزمایشی بدست آمده در شکل ۶ برای مشعل A، مشاهده می‌شود که برای نسبت اختلاط‌های مختلف منحنی پیش شعله با افزایش سرعت جریان خروجی از مشعل تغییر می‌کند، زیرا با افزایش سرعت اولیه جریان خروجی، سرعت آشفستگی شعله نیز افزایش می‌یابد. از طرفی، منحنی دمشی شعله با افزایش سرعت جریان خروجی از مشعل تقریباً ثابت مانده و تغییر نمی‌کند. ناحیه ما بین منحنی دمشی و پیش بیانگر محدوده پایداری شعله می‌باشد. کمترین سرعت اولیه جریان خروجی مورد نیاز برای پیشگیری از پدیده پیش، $U_0=3.74$ متر بر ثانیه، تقریباً متناسب با نسبت اختلاط استوکیومتری، $\phi=0.90$ بدست می‌آید. همچنین، در شکل ۷ برای مشعل B، کمترین سرعت مورد نیاز برای جلوگیری از پدیده پیش، 3.34 متر بر ثانیه، متناسب با $\phi=0.95$ رویت شده است. بنابراین، برای سرعت اولیه جریان خروجی، $U_0 > 4$ متر بر ثانیه، نباید نگران اتفاق پدیده پیش در مشعل‌های کم پیچش بود. در این آزمایشات مشاهده شده که به طور تقریبی برای سرعت اولیه جریان خروجی کمتر از $3/3$ متر بر ثانیه در مشعل A و $3/7$ متر بر ثانیه در مشعل B با افزایش نسبت اختلاط در محدوده بالای استوکیومتری، شعله از لبه مشعل جدا و معلق می‌ماند.



شکل ۷- محدوده دمش و پیش برای مشعل B



شکل ۸- محدوده دمش و پیش برای صفحه سوراخدارهای مختلف (عدد پیش متفاوت) [۱۲]

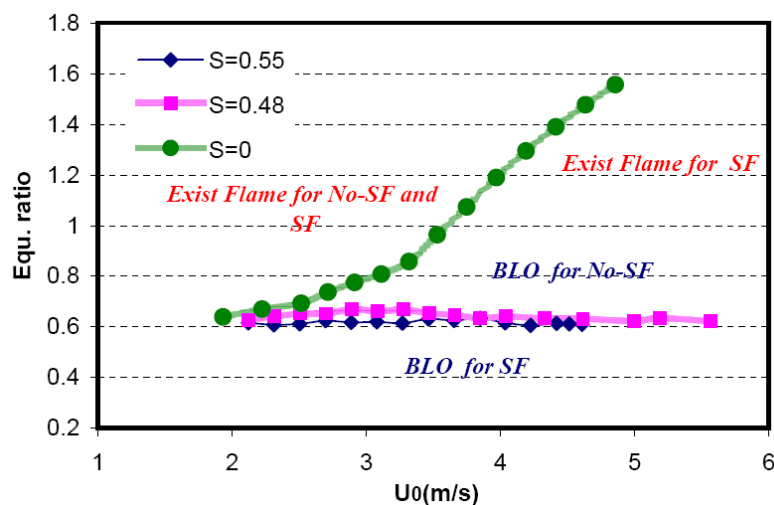
محدوده دمش و پیش بدست آمده از نتایج تجربی در شکل ۶ و ۷ با نتایج آقای چنگ [۱۲]، شکل ۸ همخوانی دارد. با افزایش نسبت انسداد یا عدد پیش در محدوده جریان‌های کم پیش، محدوده پایداری شعله افزایش می‌یابد. یعنی، محدوده پایداری شعله برای محدوده خاصی از عدد پیش، بیشتر می‌شود. برای عدد پیش بیش از حد، جریان برگشتی در پایین دست مشعل تولید شده و موجب حرکت شعله به سمت مشعل خواهد شد.

با مشاهده تصاویر مربوط به شعله‌های پیچشی در دبی‌های متفاوت می‌توان به طور فیزیکی حدس زد که در کدام محدوده از دبی کل جریان، پدیده پیش اتفاق می‌افتد. مقدار سرعت اولیه جریان خروجی از مشعل با استفاده از دبی کل جریان و سطح مقطع خروجی قابل محاسبه است. بنابراین، مقدار مینیمم سرعت اولیه جریان خروجی از مشعل برای جلوگیری از برگشت شعله به داخل آن بدست می‌آید. از آنجا که، سرعت لامینار شعله، S_L در تعادل استوکیومتریک بیشترین مقدار خود را داشته، لذا در این ناحیه ماکزیمم سرعت آشفتهگی شعله، S_T وجود دارد. اگر، سرعت اولیه جریان خروجی از مشعل بیشتر از سرعت آشفتهگی شعله باشد، در این صورت شعله در یک فاصله معین از لبه آن ساکن خواهد ماند.

با مشاهده شکل ۹ برای جریان‌های پیچشی، SF^1 در مشعل‌های سری A و B منحنی دمش مستقل از سرعت اولیه جریان خروجی بوده، در حالی که، این منحنی در مشعل بدون جریان پیچشی، $No-SF^2$ تغییر کرده و با افزایش سرعت مقدار نسبت اختلاط افزایش می‌یابد. لذا، محدوده رقیق سازی، یکی از مزیت‌های مهم مشعل‌های کم پیش در امر احتراق به شمار می‌آید که از این تکنیک برای کاهش دمای شعله و میزان آلاینده‌ها استفاده می‌شود.

¹ Swirl Flow

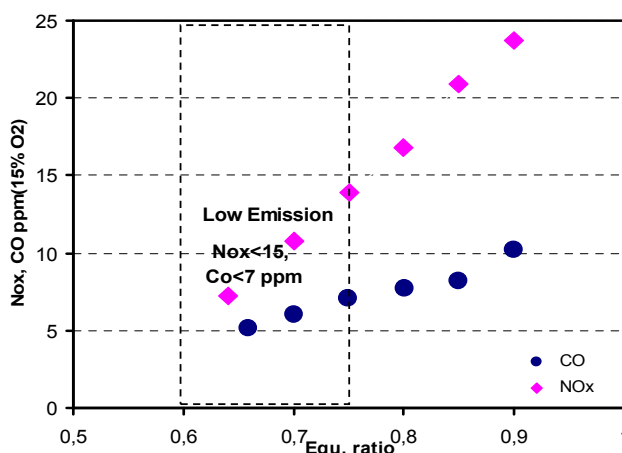
² No-Swirl Flow



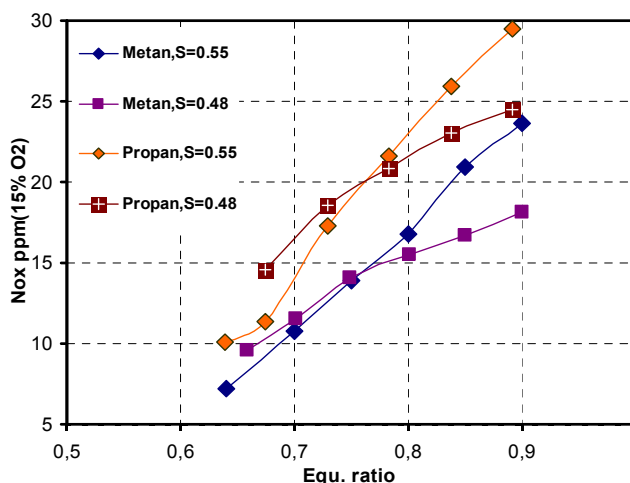
شکل ۹- مقایسه محدوده دمشی در مشعل‌های سری A، B و بدون پیچش

۴-۴- کاهش آلاینده‌ها

می‌توان با بررسی و مطالعه نتایج حاصل از انواع مشعل‌ها دریافت که تنها مشعل‌های کم پیچش قادر به تولید شعله‌های خیلی رقیق می‌باشند. میزان تولید NO_x قویاً وابسته به دمای شعله می‌باشد و از آنجا که، دمای شعله رقیق نسبت به دیگر شعله‌های پیش مخلوط یا دیفیوژن حاصل از مشعل‌های معمولی کمتر بوده لذا، مشعل کم پیچش یک گزینه مناسب برای کاهش آلاینده‌ها به خصوص NO_x به شمار می‌رود. برای اندازه‌گیری آلاینده‌ها از سیستمی مشابه بویلرها استفاده شده که در آن، مشعل‌های کم پیچش نصب شده است. با نمونه‌برداری از گازهای خروجی می‌توان میزان آلاینده‌های مانند NO_x را به وسیله الکتروود شیمیایی اندازه‌گیری کرد. در شکل ۶ میزان NO_x بر حسب نسبت اختلاط برای گاز متان نشان داده شده و تقریباً رابطه خطی بین این دو برقرار است یعنی، با افزایش نسبت اختلاط، میزان NO_x نیز افزایش می‌یابد. همانطور که از نمودار ۶ مشاهده می‌شود، در شرایط خیلی رقیق یعنی، $\phi < 0.7$ میزان $NO_x < 12$ و $CO < 7$ پی‌پی‌ام با O_2 ۱۵٪ بوده ولی در محدوده استوکیومتریک میزان $NO_x < 25$ و $CO < 10$ پی‌پی‌ام با O_2 ۱۵٪ است. بنابراین، مشعل کم پیچش شرایط خوبی نسبت به سایر مشعل‌های معمولی داشته و نیاز به هیچ گونه کاتالیزگر و سیستم خنک کاری شعله برای کاهش آلاینده‌ها ندارد. لذا، مشعل کم پیچش یک روش کم هزینه و آسان برای کاهش آلاینده‌ها تلقی می‌شود. میزان آلاینده‌های حاصل از مشعل‌های کم پیچش طبق استاندارد آلاینده‌های جهانی می‌باشد و یک روش نوین در علم احتراق برای کاهش NO_x به حساب می‌آید.



شکل ۶- حالت بهینه برای کمترین آلاینده‌گی با سوخت متان ($S=0.55$)



شکل ۷- میزان تغییرات NO_x بر حسب نسبت اختلاط به ازای عدد پیچش مختلف ($S=0.48$, $S=0.55$) و سوخت متفاوت

در شعله‌های پر پیچش اگرچه، وجود نواحی برگشتی می‌تواند با ایجاد اختلاط و تبخیر مناسب‌تر باعث پایداری شعله و بهبود عملکرد احتراق شود، اما افزایش کنترل نشده شدت پیچش، موجب افزایش جریان‌های برگشتی (گازهای داغ) می‌شود که با افزایش جریان‌های برگشتی دمای ناحیه برگشتی افزایش می‌یابد. این افزایش دما زمینه را برای تشکیل NO_x فراهم می‌کند. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، برای عدد پیچش 0.48 و 0.55 با افزایش میزان پیچش در محدوده استوکیومتری که دلیل حضور ناحیه برگشتی داغ، میزان ناکس افزایش یافته ولی در محدوده رقیق به دلیل پایین بودن دمای ناحیه برگشتی از میزان ناکس آن کاسته شده‌است.

۵- نتیجه‌گیری

با پیشرفت تکنولوژی و گسترش علم احتراق، همواره محققین به دنبال چاره‌ای برای کاهش آلاینده‌ها در مشعل‌های صنعتی، بویلرها و توربین‌های گازی بوده‌اند. برای کاهش میزان آلاینده‌ها باید ابزاری را انتخاب کرد تا محدوده اشتعال پذیری

احتراق را افزایش داد، یعنی بتوان در نسبت اختلاطهای رقیق شعله پایداری ایجاد کرد. از آنجا که، احتراق کم پیچش یک تکنیک نوین برای افزایش پایداری شعله معرفی شده به طوریکه، شعله از مشعل جدا و در یک فاصله معین ساکن خواهد ماند. زیرا با خروج جریان پیچشی از دهانه خروجی مشعل، به دلیل وجود نیروی گریز از مرکز و گرادیان فشار محوری، جریان واگرا ایجاد شده و در راستای محوری سرعت جریان تقلیل می‌یابد. لذا شعله پس‌زده نمی‌شود، زیرا سرعت جریان خروجی بیشتر از سرعت آشفته‌گی شعله است و همچنین، شعله دمیده نمی‌شود، چون سرعت جریان پایین دست آن کمتر از سرعت شعله می‌باشد. با انجام آزمایشات روی مشعل کم پیچش موارد زیر مشاهده شده است:

در محدوده جریان کم پیچش شعله از مشعل جدا بوده و هیچ گونه تنش دمایی به دیواره آن وارد نمی‌کند. لذا، می‌توان مشعل مورد نظر را از جنس سبک و ارزان قیمت ساخت. با افزایش عدد پیچش در محدوده $0.4 < S < 0.55$ موجب اختلاط بهتر پیش مخلوط سوخت و هوا شده و می‌توان آن را بیش از حد رقیق سوزاند که باعث کاهش میزان ناکس در محدوده رقیق می‌شود زیرا، دمای شعله در این ناحیه کاهش می‌یابد. همچنین، میزان ناکس حاصل از احتراق برای عدد پیچش 0.55 در شرایط رقیق کمتر از عدد پیچش 0.48 بوده ولی در شرایط استوکیومتری برعکس آن صادق است.

مراجع

- 1- Williams, A., "Experimental investigation of premixed combustion within highly porous media", Proceeding of the ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference, pp. 752-758, 1992.
- 2- International Energy Agency, *Key World Energy Statistics*. Paris, France, 2006.
- 3- Bowman, C. T., "Control of Combustion-Generated Nitrogen Oxide Emissions: technology Driven By regulations," 24th Symposium on Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 859-878, 1992.
- 4- D. Littlejohn, A. J. Majeski, S. Tonse, C. Castaldini and R. K. Cheng, "Laboratory investigation of an ultra low NOx premixed combustion concept for industrial boilers", *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 29, pp 1115-1121, 2002.
- 5- D. Littlejohn and R.K. Cheng, "Fuel effects on a low-swirl injector for lean premixed gas turbines", *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 31, Issue 2, January 2007, Pages 3155-3162.
- 6- M. R. Johnsona, D. Littlejohna, W. A. Nazeerb, K. O. Smithb, R. K. Cheng "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*, vol. 30, pp 2867-2874, 2005.
- 7- Nazeer, W.A., Smith, K.O., Sheppard, P., Cheng, R.K., and Littlejohn, D., "Full Scale Testing of a Low Swirl Fuel Injector Concept for Ultra-Low NOx Gas Turbine Combustion Systems, *ASME PaperGT2006-90150*.
- 8- Schefer, R.W., Wicksall, D.W., and Agrawal, A.K., "Combustion of Hydrogen-Enriched Methane in a Lean Premixed Swirl-Stabilized Burner," *Proc. of the Comb. Inst.*, 29, pp. 843-851, 2002.
- 9- Wicksall, D.M., Agrawal, A.K., Schefer, R.W., and Keller, J.O., "Influence of Hydrogen Addition on Flow Structure in Enclosed Swirling Methane Flame," *Journal of Propulsion and Power*, 21 pp 16-24., 2005.
- 10- Wicksall, D.W., Agrawal, A.K., Schefer, R.W., and Keller, J.O., "The Interaction of Flame and Flow Field in a Lean Premixed Swirl-Stabilized Combustor Operated on H₂/CH₄/Air, *Proc. of the Comb. Inst.*, 30, pp. 2875-2883, 2005.
- 11- N. A. chigier and J. M. beer, "Velocity and static pressure distributions in swirling air jets issuing from annular and divergent nozzles," *Trans. ASME 86D, J. Basic Eng.*, vol. 4, pp 788-796, 1964.
- 12- R. K. Cheng, S.A. Fable, D. Schmidt, L. Arellano and K.O. Smith, "Development of a low swirl injector concept for gas turbines", *University of California*, Paper LBNL-47801, 2000.
- 13- R. K. Cheng, T. Yegian, "Mechanical Swirler for A Low-NOx, Weak-Swirl Burner," United States Patent,



انجمن احتراق ایران

FCCI2010-1140

سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - اسفند ماه ۱۳۸۸



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دانشکده مهندسی هوافضا

US005879148A, Mar. 9, 1999