

مطالعه تجربی اثرات پیش گرم سازی جریان هوای ورودی در مشعل دوپیشی SGTMC

بنیامین اسدی

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شریف
benyamin.asadi1994@gmail.com

امیر مردانی

استادیار دانشگاه صنعتی شریف
amardani@sharif.edu

حامد رضا پور رستاقی

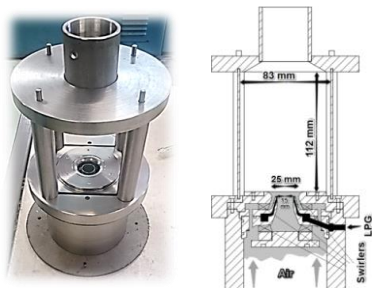
دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شریف
hamed.r2002@gmail.com

چکیده

در شبیه سازی ساختارهای غالب میدان جریان آغاز شده است که این سیر مطالعاتی با بررسی برخی مدل های احتراقی نظیر EDC و TPDF به تکامل رسیده است [۳،۴،۱۰]. این روند با بازطراحی GTMC برای انجام مطالعات تجربی و درک فیزیکی عمیق تر در مورد این مشعل، ادامه یافته است. در ادامه همین تیم، مطالعات تجربی روی این نسخه بازطراحی شده - که SGTMC نامگذاری شده است- را در سال ۲۰۱۷ با هدف شناخت بهتر این مشعل و در قدم اول با بررسی رفتار پایداری شعله تحت پارامترهای هندسی متفاوت پی گرفته است [۱]. بررسی اثرات حضور دیواره ها و نوع انژکتور تحت سوخت متفاوت و اندازه گیری میزان تشکیل آلاینده های احتراقی نظیر اکسیدهای نیتروژن، کربن مونواکسید و هیدروکربن های نسوخته در دستور کار مطالعه قرار داشته است. با این حال هنوز مسائل زیادی در مورد این مشعل بی پاسخ مانده است که مطالعات بیشتری را می طلبد. یکی از مهم ترین مسائل در حوزه توربین گاز که امروزه مورد بررسی بسیاری از محققان قرار می گیرد، افزایش بازده حرارتی و کاهش آلاینده های احتراقی به خصوص NOx است [۱۰-۱]. یکی از راهکارها برای افزایش بازدهی، بازیابی حرارت جریان داغ خروجی از توربین است. این حرارت می تواند جهت پیش گرم سازی هوای مورد نیاز در محفظه احتراق استفاده شود و در جهت بهبود پایداری آن مفید باشد. با توجه به اینکه دما در خروجی توربین های گازی در حدود ۵۰۰ درجه سانتی گراد است، با بازیابی و هدایت این میزان حرارت به طرف ورودی محفظه، می توان شرایط را برای پیش گرم سازی هوا تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد فراهم کرد. بنابراین بررسی اثرات این میزان پیش گرم سازی هوای ورودی روی کارایی و رفتار محفظه احتراق در صورت مثبت بودن می تواند راهکاری جذاب برای افزایش بهره وری سیستم های توربین گاز باشد. در این مطالعه، بررسی اثرات پیش گرم سازی ۱۰۰ درجه ای هوا روی پایداری شعله و میزان آلاینده ها در دستور کار می باشد.

هندسه مشعل

طرح کلی هندسه مشعل SGTMC که با الهام از مدل مرجع آلمانی آن، GTMC طراحی و ساخته شده است، به همراه تصویری واقعی از آن در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. هندسه مشعل SGTMC

در این مطالعه با انجام دسته ای از آزمایشات تجربی، اثرات پیش گرم سازی جریان هوای ورودی مورد نیاز احتراق تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد روی پایداری شعله و میزان دما و NOx خروجی از مشعل SGTMC با دو ورودی هوای پیشی بررسی شده است. نتایج آزمایشات نشان می دهد که پیش گرم سازی جریان هوای ورودی، حد رقیق پایداری شعله را تنها در دبی بالا تا حدودی بهبود می دهد. ناحیه دبی پایین در این محفظه که در مطالعات گذشته، ناحیه ای غیر حساس به پارامترهای هندسی نظیر دیواره و انژکتور نشان داده، در مقابل پیش گرم سازی جریان هوا تا این دما نیز حساسیتی از خود نشان نمی دهد. اندازه گیری میزان دما در خروجی محفظه در برخی شرایط عملکردی معین در ناحیه دبی بالا، در حالت پیش گرم و مقایسه آن با حالت غیر پیش گرم، حکایت از افزایش نسبی آن دارد. همچنین اندازه گیری میزان آلاینده NOx در خروجی محفظه، افزایش این آلاینده را در شرایط هوای ورودی پیش گرم نشان می دهد که این مسئله را می توان تاثیر مستقیم افزایش دمای محفظه و تاثیر آن در افزایش نرخ تشکیل NOx حرارتی دانست.

کلمات کلیدی: تجربی، توربین گاز، محفظه احتراق دوپیشی

مقدمه

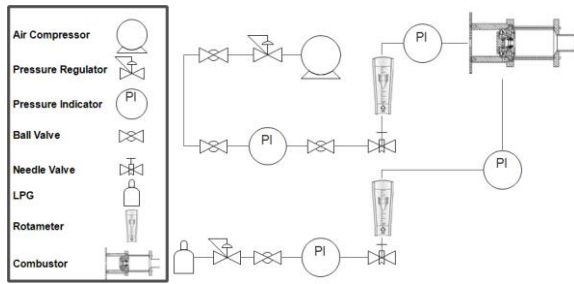
فواید استفاده از پیش گرم سازی در کاهش میزان آلاینده ها و بهبود عملکرد محفظه های احتراق توربین گاز، محققان را به بررسی عمیق تر این مفهوم در حوزه احتراق واداشته است [۱۰-۱]. تا آنجا که امروزه مطالعات گسترده ای روی محفظه های احتراق با پیشی چندگانه در حال انجام است. اوایل هزاره سوم میلادی، مرکز هوافضای آلمان^۱ مشعلی با پیشی دوگانه به نام GTMC^۲ طراحی کرده است. این مشعل دارای دو ورودی هوای پیشی هم جهت است که تزریق سوخت را از بین دو ورودی هوا انجام می دهد. تا به امروز، محققان زیادی این مشعل را مورد مطالعه قرار داده اند که ثمره آن، داده های ارزشمندی است که می تواند در اعتبارسنجی های عددی و تجربی مورد استفاده قرار گیرد. اما عمده مطالعات روی GTMC تحت سه شرایط عملکردی با رفتارهای خاص احتراقی انجام گرفته است؛ شعله ای کاملاً پایدار، شعله ای که بروز ناپایداری های ترموآکوستیکی^۳ را به همراه دارد و شعله ای که در نزدیکی حد رقیق خاموشی با خاموشی های جزئی پی در پی و ناگهانی همراه است [۱،۲]. این طیف مطالعاتی از سال ۲۰۰۴ روی این مشعل آغاز شده است که عمدتاً در حوزه بررسی های لیزری میدان جریان، شبیه سازی عددی میدان جریان احتراقی و غیر احتراقی، ناپایداری های احتراقی و رفتارهای جریان در نزدیک حد رقیق خاموشی بوده است [۲۳-۱]. در سال ۲۰۱۶ مردانی و همکاران، مطالعات خود را روی این مشعل آغاز کرده اند. فاز اول این مطالعات با شبیه سازی عددی میدان جریان حاکم بر فضای درون محفظه و با بررسی توانایی مدل های توربولانسی پایه RANS^۴

^۱ German Aerospace Center (DLR)

^۲ Gas Turbine Model Combustor

^۳ Thermo-acoustic Instabilities

^۴ Reynolds-Averaged Navier Stokes



شکل ۵. طرح کلی میز آزمایش

در این مطالعه، از ۴ فلومتر برای اندازه‌گیری دبی جریان سوخت و هوا استفاده شده است که اطلاعات مربوط به آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. خطای در نظر گرفته شده برای فلومترها

| فلومتر | بیشینه خطا [m ³ /hr] | بازه اندازه‌گیری [m ³ /hr] | درصد خطا از مقیاس کامل |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| فلومتر دیجیتالی | ۰/۰۰۲۴ | ۰/۱۲-۱ | ۲ |
| روتامتر ۱ | ۰/۱ | ۰/۲-۲ | ۵ |
| روتامتر ۲ | ۰/۲ | ۰/۶-۶ | ۳/۳۳ |
| روتامتر ۳ | ۱ | ۷-۷۰ | ۱/۴۳ |

جهت اطمینان از تکرارپذیری نتایج آزمایشات، هر کدام سه بار تکرار شده‌اند. همچنین ترکیب گازها و دما در خروجی به وسیله یک دستگاه آنالیزور گاز KIMO (KIGAZ 300) اندازه‌گیری شده است که پارامترهای فنی مربوط به آن در جدول ۲ ارائه شده است. این سیستم اندازه‌گیری با مکش جریان موردنظر از طریق لوله‌ای که در ابتدای آن تعبیه شده است، پارامترهای مختلفی نظیر دمای محصولات، NO_x و برخی دیگر از اجزای واکنشی را با توجه به نوع سوخت مورد استفاده اندازه‌گیری کرده، گزارش می‌دهد.

جدول ۲. پارامترهای فنی دستگاه آنالیزور گاز (KIGAZ 300)

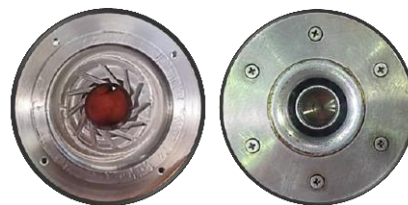
| KIMO | | |
|-----------------|-----------------------------------|---|
| پارامتر | بازه اندازه‌گیری | بیشینه خطا |
| CH ₄ | صفر تا ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام ^۸ | ۲۰ درصد مقیاس کل |
| O ₂ | صفر تا ۲۱ درصد | ۰/۲ درصد |
| CO | صفر تا ۸۰۰۰ پی‌پی‌ام | صفر تا ۲۰ پی‌پی‌ام: ۱۰ پی‌پی‌ام ۲۰ تا ۲۰۰ پی‌پی‌ام: ۵ درصد مقدار ۲۰۱ تا ۸۰۰۰ پی‌پی‌ام: ۱۰ درصد مقدار اندازه‌گیری شده |
| دما | ۱۰۰- تا ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد | ۴ درصد مقدار اندازه‌گیری شده |
| NO | صفر تا ۵۰۰۰ پی‌پی‌ام | صفر تا ۱۰ پی‌پی‌ام: ۵ پی‌پی‌ام ۱۰ تا ۵۰۰۰: ۵ درصد مقدار اندازه‌گیری شده |
| NO ₂ | صفر تا ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام | صفر تا ۱۰ پی‌پی‌ام: ۵ پی‌پی‌ام ۱۰ تا ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام: ۵ درصد مقدار اندازه‌گیری شده |

لازم به ذکر است که مجموع NO و NO₂ به عنوان NO_x در نظر گرفته می‌شود.

ابعاد محفظه همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است ۸۳×۸۳×۱۱۲ میلی‌متر مکعب است. دو ورودی هوای پیچشی به صورت موازی جریان هوای اتمسفریک را از منبعی مشترک به فضای درون محفظه تزریق می‌کنند. هوای خشک با گذر از ۸ کانال شعاعی در ورودی مرکزی (قطر ۱۵ میلی‌متر) و ۱۲ کانال شعاعی در ورودی حلقوی (قطر داخلی ۱۷ میلی‌متر و قطر خارجی ۲۵ میلی‌متر) با پیچشی هم‌جهت، به فضای درون محفظه هدایت می‌شود که تصویر از هندسه این دو ورودی در شکل ۲ شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۲. ورودی هوای مرکزی^۵ مشعل SGTMC



شکل ۳. ورودی هوای حلقوی^۶ مشعل SGTMC

سوخت LPG^۷ از طریق ۷۲ کانال محوری مربعی شکل به ابعاد ۰/۵×۰/۵ میلی‌متر مربع که به صورت حلقوی حول ورودی هوای مرکزی قرار گرفته‌اند، از بین دو ورودی هوا به داخل محفظه پاشیده می‌شود. نتایج مطالعات پیشین نشان می‌دهد که با وجود تزریق جداگانه سوخت و هوا، هندسه منحصر بفرد این مشعل منجر به اختلاط بسیار خوب سوخت و اکسیدکننده پیش از ورود مخلوط به ناحیه واکنشی می‌شود به همین دلیل شعله‌ای از نوع نیمه‌پیش‌آمیخته در این محفظه احتراق تشکیل خواهد شد. تصویری به همراه جزئیات از انژکتور سوخت در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. هندسه انژکتور سوخت مشعل SGTMC

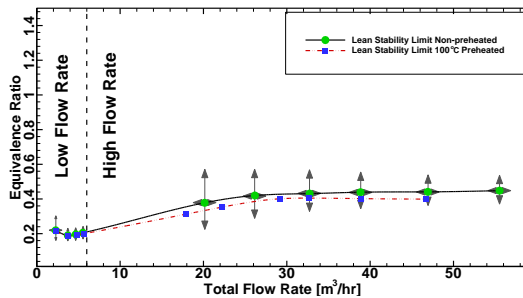
تجهیزات میز آزمایش

طرح کلی میز آزمایش و تجهیزات آزمایشگاهی به کاررفته، در شکل ۵ نشان داده شده است.

^۵ Central Air Inlet
^۶ Annular Air Inlet
^۷ Liquefied Petroleum Gas

^۸ PPM (Part Per Million)

نتایج و بحث



شکل ۶. حد رقیق پایداری شعله در حالت پیش گرم و غیرپیش گرم

در جدول ۳ و جدول ۴، شرایط عملکردی مربوط به حد رقیق خاموشی شعله به ترتیب در شرایط غیرپیش گرم و پیش گرم ارائه شده است.

جدول ۳. شرایط عملکردی مربوط به حد رقیق پایداری شعله در

شرایط غیرپیش گرم

| نسبت هم‌ارزی | دبی کل | دبی هوا | دبی سوخت |
|--------------|--------|---------|----------|
| ۰/۲۱۹ | ۲/۲۶۹ | ۲/۲۵۲ | ۰/۰۱۷ |
| ۰/۱۸۹ | ۳/۷۲۵ | ۳/۷ | ۰/۰۲۵ |
| ۰/۱۹۷ | ۴/۶۷۸ | ۴/۶۴۷ | ۰/۰۳۲ |
| ۰/۲۰ | ۵/۵۳ | ۵/۴۹ | ۰/۰۴ |
| ۰/۳۷۸ | ۲۰/۱۳۹ | ۱۹/۸۷۴ | ۰/۲۶۵ |
| ۰/۴۲۰ | ۲۶/۱۶۶ | ۲۵/۷۸۳ | ۰/۳۸۲ |
| ۰/۴۳۱ | ۳۲/۷۳۶ | ۳۲/۲۲۹ | ۰/۵۰۷ |
| ۰/۴۳۹ | ۳۸/۸۴۳ | ۳۸/۲۶۹ | ۰/۵۷۴ |
| ۰/۴۴۱ | ۴۶/۹۲۱ | ۴۶/۲۴۶ | ۰/۶۴۵ |
| ۰/۴۴۸ | ۵۵/۵۲۳ | ۵۴/۶۵۴ | ۰/۸۶۷ |

جدول ۴. شرایط عملکردی مربوط به حد رقیق پایداری شعله در

شرایط پیش گرم

| نسبت هم‌ارزی | دبی کل | دبی هوا | دبی سوخت |
|--------------|--------|---------|----------|
| ۰/۲۱۴ | ۲/۳۱۲ | ۲/۲۹۴ | ۰/۰۱۷ |
| ۰/۱۸۵ | ۳/۷۹۴ | ۳/۷۶۹ | ۰/۰۲۴ |
| ۰/۱۹۲ | ۴/۷۶۷ | ۴/۷۳۵ | ۰/۰۳۲ |
| ۰/۱۹۹ | ۵/۶۳ | ۵/۵۹ | ۰/۰۳۹ |
| ۰/۱۹۹ | ۵/۶۳ | ۵/۵۹ | ۰/۰۳۹ |
| ۰/۳۱۲ | ۱۷/۸۶۲ | ۱۷/۶۶۷ | ۰/۱۹۵ |
| ۰/۳۵۳ | ۲۲/۲۲۳ | ۲۱/۹۵ | ۰/۲۷۳ |
| ۰/۴۰۱ | ۲۹/۱۲۵ | ۲۸/۶۹۶ | ۰/۴۲۹ |
| ۰/۴۰۵ | ۳۲/۶۱۳ | ۳۲/۱۲۲ | ۰/۴۹۱ |
| ۰/۴۰۲ | ۳۸/۸۷۸ | ۳۸/۳۳۲ | ۰/۵۴۶ |
| ۰/۳۹۹ | ۴۶/۶۸۹ | ۴۶/۰۴۲ | ۰/۶۴۷ |

در این قسمت، نتایج آزمایشات تجربی مشعل توربین گاز دوپیش‌گرم SGTMC با سوخت LPG ارائه شده است. ابتدا، اثرات پیش‌گرم‌سازی^۹ جریان هوای ورودی تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بر روی پایداری شعله بررسی شده است. سپس با توجه به نمودار پایداری، چند شرایط عملکردی انتخاب شده، میزان آلاینده NO_x آن‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد تا نقاط ضعف و قوت پیش‌گرم‌سازی از دیدگاه پایداری و آلاینده مورد بررسی قرار گیرد.

پایداری شعله و اثرات پیش‌گرم‌سازی

در شکل ۶ منحنی حد رقیق پایداری شعله در حالات پیش‌گرم و غیرپیش‌گرم نمایش داده شده است. در این نمودار، محور افقی مجموع دبی هوا و سوخت، و محور عمودی نسبت هم‌ارزی را نشان می‌دهد. مطابق مطالعه پیشین روی این محفظه، دبی‌های کمتر از ۶ مترمکعب بر ساعت با عنوان ناحیه دبی پایین و دبی‌های بالاتر از آن، ناحیه دبی بالا نام‌گذاری شده‌اند. همانطور که مشخص است، ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم‌سازی هوا، مقدار کمی پایداری شعله را در ناحیه دبی بالا بهبود بخشیده است. اما ناحیه دبی پایین، در مقابل پارامتر پیش‌گرم‌سازی تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، حساسیتی از خود نشان نمی‌دهد. این عدم حساسیت در دبی پایین در مطالعه پیشین روی SGTMC در بررسی برخی پارامترهای هندسی هم دیده شده است [۱]. چرایی بهبود پایداری در ناحیه دبی بالا را می‌توان از چند زاویه مورد بررسی قرار داد.

نگاه اول به ساختارهای جریان درون این محفظه برمی‌گردد. در مشعل‌های پرپیچش از جمله SGTMC، هوا به صورت پیچشی وارد فضای محفظه می‌شود که پیرو آن، نیرویی گریز از مرکز، هوا را به سمت دیواره‌ها سوق می‌دهد، در نتیجه گرادبان فشاری شعاعی و در پی آن ناحیه‌ای با فشار پایین روی محور شکل می‌گیرد. از طرفی با پیش‌روی جریان به پایین‌دست و اثرات اتلافی جریان، به‌طورهمزمان گرادبان فشاری به سمت بالادست نیز شکل می‌گیرد که در مجموع، سبب بازگشت جریان روی محور به سمت بالادست و تشکیل ناحیه بازگشتی داخلی می‌شود. این ناحیه با هدایت رادیکال‌های پرانرژی حاصل از احتراق به سمت بالادست و ریشه جریان، نقشی اساسی در پایداری^{۱۰} و خوداتکایی^{۱۱} شعله ایفا می‌کند. اما با پیش‌گرم‌سازی هوا، انرژی جنبشی و در نتیجه سرعت جریان هوای ورودی افزایش می‌یابد که فعل و انفعالات میدان جریان، گرادبان‌های سرعت و ناحیه بازگشتی داخلی را تقویت می‌کند. بنابراین تقویت رفتار شعله از حیث پایداری بر اساس ساختارهای میدان جریان، قابل پیش‌بینی است.

نگاه دوم به ذات تاثیر پیش‌گرم‌سازی و بهبود اشتعال‌پذیری مخلوط به دلیل افزایش سطح آنتالپی واکنش‌دهنده‌ها^{۱۲} برمی‌گردد. در حالت کلی، جریان با انرژی اولیه بالاتر از حالت غیرپیش‌گرم، به‌نسبت، شعله‌ای خوداتکاتر و پایدارتر را بروز خواهد داد.

⁹ Preheating

¹⁰ Stabilization

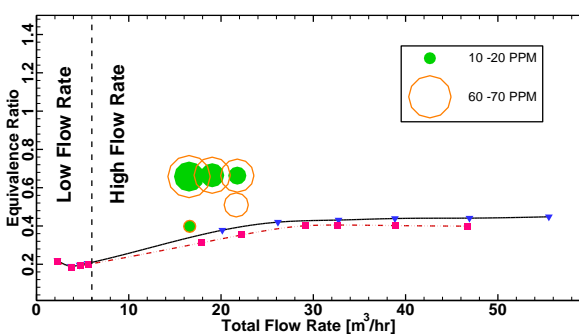
¹¹ Self-Sustaining

¹² Reactants

دما و NO_x خروجی

همراه خواهد بود. شاید در نگاه اول و باتوجه به تحلیل این نقاط از نظر میزان دما و این حقیقت که میزان دما با افزایش همراه بوده است، انتظار این بود که میزان NO_x هم با توجه به اثرات مستقیمی که NO_x حرارتی^{۱۴} از میزان دما می‌پذیرد، با افزایش روبرو شود اما اندازه‌گیری‌ها چیز دیگری نشان می‌دهند. تحلیل متقن و مستدل این رفتار، در نظر گرفتن میدان جریان حاکم و ساختارهای اصلی دربرگیرنده فضای محفظه را می‌طلبد. بدین منظور در شکل ۹ توزیع دمای درون محفظه برگرفته از مطالعه‌ای پیشین روی SGTMC ارائه شده است [۳۰]. در کل، نتایج نشان می‌دهند که فارغ از میزان دبی جریان ورودی، ساختارهای اصلی حاکم بر فضای محفظه، همواره دو جز اصلی را در شرایط احتراقی و غیراحتراقی شامل می‌شوند [۲،۳۰]. این دو جز، به دو ناحیه‌ای اطلاق می‌شوند که با بازگرداندن جریان به سمت بالادست و ریشه جریان و تشکیل نواحی بازگشتی، نقش برجسته‌ای در پایداری شعله ایفا می‌کنند [۱،۲،۳۰]. در این بین، ناحیه بازگشتی داخلی که محصولات احتراقی را در تقابل مستقیم با جریان ورودی قرار می‌دهد، نقش پررنگ‌تری دارد [۱،۲،۳۰]. در شکل ۹ این دو ساختار مهم که با عناوین ناحیه بازگشتی داخلی^{۱۵} و ناحیه بازگشتی خارجی^{۱۶} شناخته می‌شوند؛ در شرایط احتراقی، با خطوط سرعت محوری صفر مشخص شده‌اند. مشاهده می‌شود که بیشینه دما در محفظه، درون ناحیه بازگشتی داخلی اتفاق خواهد افتاد. بنابراین با توجه به سرعت کمتر این ناحیه نسبت به سایر نواحی، زمان اقامت محصولات احتراق در این ناحیه، نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان نرخ تولید و انتشار آلاینده NO_x خواهد داشت. با این اوصاف، می‌توان درک کرد که چرا با افزایش دبی جریان، میزان NO_x خروجی باوجود افزایش دما، با کاهش نسبی روبرو شده است. علت این امر را به‌طورمشخص می‌توان به کاهش زمان اقامت محصولات احتراق با افزایش دبی جریان ورودی در ناحیه دمابالای بازگشتی داخلی نسبت داد.

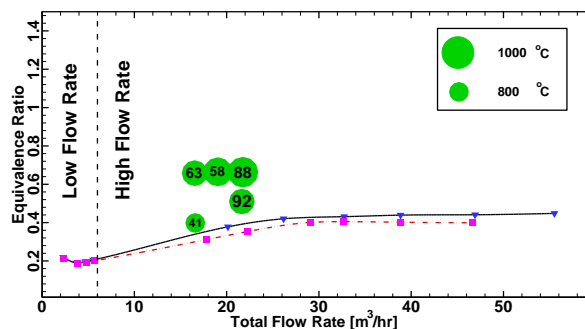
در بررسی اثر پیش‌گرمایش روی میزان NO_x ، مشاهده می‌شود که همین رفتار در حالت پیش‌گرم نیز تکرار می‌شود. درحالت کلی، پیش‌گرم‌سازی هوا باعث افزایش نسبی میزان NO_x شده است. این موضوع با توجه به افزایش نسبی سطح دمای محصولات به‌دلیل پیش‌گرم‌سازی و تاثیر آن در افزایش NO_x حرارتی، طبیعی به نظر می‌رسد.



شکل ۸. میزان انتشار NO_x از محفظه در شرایط پیش‌گرم و غیرپیش‌گرم

در این بخش، تاثیر پیش‌گرم‌سازی هوا روی دمای خروجی و میزان تولید آلاینده مهم NO_x که اثرات محیطی مخربی را در پی دارد، در چند شرایط عملکردی با توجه به نمودار پایداری بررسی می‌شود. پیشتر اشاره شد که برای اندازه‌گیری دما و NO_x خروجی، از یک دستگاه آنالیزور گاز استفاده شده است که برای جلوگیری از آسیب به سیستم اندازه‌گیری این دستگاه، اندازه‌گیری‌ها در فاصله‌ای مشخص از خروجی داغ محفظه انجام گرفته است. در همین راستا، شرایطی ترتیب داده شده است که با وجود کاهش اندک دمای محصولات احتراق تا سطحی که برای دستگاه اندازه‌گیری قابل تحمل باشد، کمترین تاثیر را از حیث زمان اقامت بر ترکیب گازهای خروجی داشته باشد. بر همین اساس، لوله‌ای به ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر و قطر ۶ سانتی‌متر بعد از صفحه خروجی محفظه تعبیه شده، اندازه‌گیری‌ها در ارتفاع ۳۸ سانتی‌متری از صفحه خروجی و روی محور لوله انجام گرفته است تا دیواره‌ها نیز کمترین تاثیر را روی ترکیب داشته باشند. در شکل ۷، مقایسه نسبی میزان دما در شرایط پیش‌گرم و غیرپیش‌گرم ارائه شده است. اندازه دایره‌ها با توجه به مقیاس تعیین شده در شکل، میزان دما را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که دایره‌های توپر، میزان دما را در حالت غیرپیش‌گرم و عدد داخل دایره‌ها میزان افزایش دمای گازهای خروجی را در حالت پیش‌گرم نشان می‌دهند. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، درحالت کلی، دمای خروجی مشعل افزایش یافته است که میزان این افزایش، تاحدودی کمتر از میزان پیش‌گرم‌سازی است. با افزایش دبی جریان ورودی در نسبت هم‌ارزی ثابت، دمای محصولات خروجی به‌واسطه افزایش فعل و انفعالات میدان جریان و نرخ واکنش‌ها که افزایش آزادسازی انرژی^{۱۳} را در پی دارد، با افزایش روبرو خواهد شد.

در دبی جریان ورودی ثابت، در شرایطی که نسبت هم‌ارزی مخلوط افزایش می‌یابد و به حد استوکیومتریکی نزدیک می‌شود، دمای محصولات نیز با افزایش قابل‌انتظاری همراه خواهد شد؛ چراکه بیشینه نرخ واکنش‌ها و دمای محصولات در نسبت هم‌ارزی یک و مخلوط استوکیومتریکی اتفاق می‌افتد و نزدیک‌شدن به این حد، افزایش دمای محسوسی را در پی خواهد داشت.



شکل ۷. دمای ترکیب خروجی از محفظه در شرایط پیش‌گرم و غیرپیش‌گرم

در شکل ۸، میزان انتشار آلاینده NO_x از محفظه در شرایط پیش‌گرم و غیرپیش‌گرم ارائه شده است. در این شکل، اندازه حلقه‌ها میزان NO_x را براساس مقیاس تعیین شده در شرایط پیش‌گرم نشان می‌دهند و دایره‌های توپر، نماینده میزان NO_x در شرایط غیرپیش‌گرم هستند. مطابق نمودار ارائه‌شده، با افزایش دبی در نسبت هم‌ارزی ثابت، مقدار NO_x با کاهش

¹⁴ Thermal NO_x

¹⁵ Inner Recirculation Zone

¹⁶ Outer Recirculation Zone

¹³ Heat Release

5- Weigand, P., Meier, W., Duan, X. R., Stricker, W., Aigner, M. "Investigations of Swirl Flames in a Gas Turbine Model Combustor: I. Flow Field, Structures, Temperature, and Species Distributions", *Comb. Flame*, 144:205-224 (2006).

6- See, Y.C., Ihme, M., "Large-Eddy Simulation of a Gas Turbine Model Combustor", 51st *AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Texas, 2013.

7- See, Y. C., Ihme, M. "Les Investigation of Flow Field Sensitivity in a Gas Turbine Model Combustor". 52nd *AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Maryland, 2014.

8- Wankhede, M. J., Tap, F. A., Schapotschnikow, P., Ramaekers, W.J., "Numerical Study of Unsteady Flow-Field and Flame Dynamics in a Gas Turbine Model Combustor". ASME Turbo Expo 2014, Düsseldorf, Germany, pp V04AT04A050-V04AT04A50.

9- See, Y. C.; Ihme, M. "Large Eddy Simulation of a Partially-Premixed Gas Turbine Model Combustor". *Proc. Comb. Inst.*, 35:1225-1234 (2015).

10- Mardani, A., Fazlollahi-Ghomshi, A., "Numerical Investigation of a Double-Swirled Gas Turbine Model Combustor Using a RANS Approach with Different Turbulence-Chemistry Interaction Models", *Energy Fuels*, 30:6764-6776 (2016).

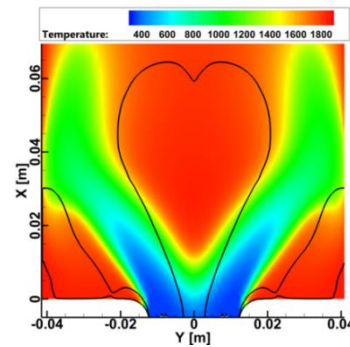
11- Stöhr., M., Boxx, I., Carter, C., D, Meier. W., "Experimental study of Vortex-Flame Interaction in a Gas Turbine Model Combustor", *Comb. Flame*, 159:2636-2649 (2012).

12- Widenhorn, A., Noll, B., Aigner, M. "Numerical Characterization of a Gas Turbine Model Combustor Applying Scale-Adaptive Simulation", *ASME Turbo Expo 2009*, pp 11-23 (2009).

13- Duan, X.R., Weigand, P., Meier, W., Keck, O., Stricker W., Aigner, M., Lehmann, B., "Experimental investigations and laser based validation measurements in a gas turbine model combustor", *Prog. Comput. Fluid Dy*, 4:175-182 (2004).

14- Weigand, P., Meier, W., Duan, X.R., Giezendanner-Thoben, R., Meier, U., "Laser diagnostic study of mechanism of a periodic combustion instability in a gas turbine model combustor", *Flow, Turb. Comb.*, 75:275-292 (2005).

15- Meier, W., Duan, X.R., Weigand, P., "Reaction zone structures and mixing characteristics of partially premixed swirling CH₄/air flames in a gas turbine model combustor", *Proc. Comb. Inst.*, 30:835-842 (2005).



شکل ۹. توزیع دما درون محفظه SGTMC [۳۰]

با این حال می توان معضل افزایش NO_x را با رقیق سازی واکنش دهنده ها برطرف کرد. پیاده سازی توامان پیش گرمایش و رقیق سازی واکنش دهنده ها وارد زمینه جدیدی از علم احتراق و مفهوم MILD Combustion می شود. احتراق در شرایط پیش گرم سازی و رقیق سازی واکنش دهنده ها با استفاده از محصولات احتراقی، زمینه جدیدی از مطالعات احتراقی است که علاوه بر کاهش آلاینده ها، کاهش آلودگی صوتی و نوری را نیز همراه دارد [۴،۲۷،۲۸،۲۹]. مطالعات مقدماتی در حوزه دینامیک سیالات عددی در زمینه احتراق MILD روی این مشعل انجام گرفته است که نتیجه گیری های متقن در باب کمیت و کیفیت کارائی آن، مطالعات گسترده تری را به خصوص در حوزه آزمایشگاهی می طلبد.

نتیجه گیری

در این مطالعه، اثرات پیش گرم سازی هوا تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد روی پایداری شعله به همراه NO_x و دمای خروجی بررسی شده است. نتایج آزمایشات نشان از تاثیر مثبت این میزان پیش گرم سازی روی پایداری شعله دارند. اما میزان NO_x خروجی از محفظه به دلیل افزایش نسبی دمای محصولات به دلیل پیش گرم سازی با افزایش روبرو خواهد شد.

مراجع

1- Mardani, A., Rezapour-Rastaaghi, H., Fazlollahi-Ghomshi, A., 2017, "Investigation of LPG Flame Structure In Double Swirl Gas Turbine Model Combustor", 10th Mediterranean Combustion Symposium, Naples, Italy.

۲- امیر مردانی، حامد رضاپور رستاقی، ۱۳۹۶، " بررسی اثرات دبی هوای ورودی بر ساختارهای اصلی میدان جریان در محفظه احتراق توربین گاز با ورودی هوای دوپیچشی"، هفدهمین کنفرانس دینامیک شاره ها، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۳- امیر مردانی و علیرضا فضل الهی قمشی، ۱۳۹۳، "مطالعه عددی جریان غیراحتراقی درون محفظه احتراق توربین گاز با استفاده از مدل های توربولانسی مختلف"، چهاردهمین کنفرانس بین المللی انجمن هوافضای ایران، تهران، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، پژوهشکده مخابرات و فن آوری ماهواره.

۴- علیرضا فضل الهی، ۱۳۹۴، مطالعه عددی احتراق مایلد در محفظه احتراق توربین گاز، رساله کارشناسی ارشد گرایش پیشرانس، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف.

[28] M. Katsuki, and T. Hasegawa, 'The Science and Technology of Combustion in Highly Preheated Air', in Symposium (International) on combustion (Elsevier, 1998), pp. 3135-46.

[29] A. Cavaliere, and M. de Joannon, 'Mild Combustion', Progress in Energy and Combustion science, 30 (2004), 329-66.

[۳۰] حامد رضاپور رستاقی، ۱۳۹۶، مطالعه تجربی و عددی محفظه احتراق توربین گاز نمونه آزمایشگاهی، رساله کارشناسی ارشد گرایش پیشرانس، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف.

16- Meier, W., Duan, X.R., Weigand, P., "Investigation of swirl flames in a gas turbine model combustor: II-Turbulence-Chemistry interactions", *Comb. Flame*, 144:225-236 (2006).

17- Sadanandan, R., Stöhr, M., Meier, W., "Simultaneous OH-PLIF and PIV measurements in a gas turbine model combustor", *Appl. Phys. B*, 90:609 618 (2008).

18- Stöhr, M., Sadanandan, R., Meier, W., "Experimental study of unsteady flame structures of an oscillating swirl flame in a gas turbine model combustor", *Proc. Comb. Inst.*, 32:2925-2932 (2009).

19- Sadanandan, R., Stöhr, M., Meier, W., "Flowfield-Flame Structure Interactions in an Oscillating Swirl Flame", *Comb. Explos. Shock Waves*, Vol. 45:518-529 (2009).

20- Boxx, I., Stöhr, M., Blumenthal, R., Meier, W., "Investigation of a Gas Turbine Model Combustor by Means of High-Speed Laser Imaging", *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Orlando, Florida, 2009.

21- Boxx, I., Stöhr, M., Carter, C., Meier, W., "Sustained multi-kHz flame front and 3-component velocity-field measurements for the study of turbulent flames", *Appl. Phys. B*, 95:23-29 (2009).

22- Boxx, I., Stöhr, M., Carter, C., Meier, W., "Temporally resolved planar measurements of transient phenomena in a partially pre-mixed swirl flame in a gas turbine model combustor", *Comb. Flame*, 157:1510 1525 (2010).

23- Steinberg, A.M., Boxx, I., Stöhr, M., Carter, C.D., Meier, W., "Flow-flame interactions causing acoustically coupled heat release fluctuations in a thermo-acoustically unstable gas turbine model combustor", *Comb. Flame*, 157:2250-2266 (2010).

24- Stöhr, M., Boxx, I., Carter, C., Meier, W., "Dynamics of lean blowout of a swirl-stabilized flame in a gas turbine model combustor", *Proc. Comb. Inst.*, 33:2953-2960 (2011).

25- Kutne, P., Kapadia, B.K., Meier, W., Aigner, M., "Experimental analysis of the combustion behavior of oxyfuel flames in a gas turbine model combustor", *Proc. Comb. Inst.*, 33:3383-3390 (2011).

26- Allison, P.M., Driscoll, J.F., Ihme, M., "Acoustic Behavior of a Partially-Premixed Gas Turbine Model Combustor", *50th AIAA Aerospace Sciences*, Nashville, Tennessee, 2012.

[27] J.A. Wüning, and J.G. Wüning, 'Flameless Oxidation to Reduce Thermal No Formation', Progress in energy and combustion science, 23 (1997), 81-94.