

## مطالعه تجربی احتراق مخلوط آمونیاک-متان در محفظه احتراق میکروتوربین گازی

میلاذ باستانی<sup>۱</sup>، صادق تابع جماعت<sup>۲</sup>، حسین عشیني<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه امیرکبیر، تهران، Milad.bastani@aut.ac.ir

۲- استاد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، Sadegh@aut.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، H\_ashini@aut.ac.ir

\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۲/۰۱/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۵)

**چکیده:** برای رسیدن به هدف انتشار کربن صفر، جایگزین کردن سوخت‌های هیدروکربنی معمول با سوخت‌های بدون کربن، از اهمیت بالایی برخوردار است. از نظر سوخت بدون کربن، آمونیاک در کنار مشکلاتی چون سرعت شعله پایین و انتشار آلاینده‌ی NOx بالا، مزایای متعددی نسبت به هیدروژن دارد. از این رو، مطالعه تجربی حاضر به بررسی اثر افزودن آمونیاک به متان و نسبت آن بر روی عملکرد احتراقی یک محفظه احتراق میکروتوربینی از نوع قوطی در شرایط اتمسفریک در دو توان حرارتی مختلف می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد آمونیاک در سوخت، بیشینه دمای شعله کاهش پیدا کرده و احتراق تا ناحیه‌ی انتهایی محفظه به تأخیر افتاده است. همچنین، افزودن آمونیاک، علی‌رغم عدم کاهش CO، افزایش شدید مقدار NOx تولیدی محفظه را به همراه دارد. به‌علاوه، اگرچه دمای خروجی محفظه بجز یک حالت، تغییر چندانی نداشته ولی بازده احتراقی محفظه با افزایش نسبت آمونیاک، افت کرده و متغیر یکپارچگی در صورت استفاده از آمونیاک، بیشتر از حالت ۱۰۰٪ گاز طبیعی است. بنابراین، اگرچه استفاده از مخلوط سوخت آمونیاک/متان با شرایط احتراق پایدار در محفظه‌ی موجود، ممکن است ولی برای رسیدن به عملکرد مطلوب احتراقی، اصلاحات جدی نیاز دارد.

**کلیدواژگان:** محفظه احتراق میکروتوربین، آمونیاک، متان، درصد اختلاط، پارامتر عملکردی

### مقدمه

احتراق سوخت‌های هیدروکربنی برای تولید انرژی، باعث انتشار آلاینده‌هایی می‌شود که عوارض زیست‌محیطی و خطرات متعددی را برای سلامت انسان ایجاد می‌کند. کاهش سریع شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای و ساخت نسل جدیدی از نیروگاه‌های پاک تا آینده‌ای نزدیک، مورد توجه کشورها قرار گرفته است. یک راه حل بالقوه برای تولید انرژی کم کربن، استفاده از هیدروژن است. با این حال، مسائل مربوط به ذخیره‌سازی و توزیع آن، در حال حاضر مانعی برای اجرای این راه‌حل است. آمونیاک به عنوان جایگزینی برای هیدروژن پیشنهاد شده است که یک حامل انرژی بدون کربن است و چگالی انرژی نزدیک به برخی از سوخت‌های فسیلی دارد [۱].

با این حال استفاده از آمونیاک با مشکلات متعددی مانند انرژی جرقه‌زنی بالا [۲،۳]، محدوده اشتعال‌پذیری کوچک [۴،۵] و نرخ واکنش پایین [۶-۹] و انتشار آلاینده‌ی NOx بالا روبرو است [۲،۳] و عدم شناخت دقیق فرآیند احتراق، انتشار آلاینده‌ها و پایداری احتراق در صورت استفاده از آمونیاک، همچنان مانع اصلی در مسیر استفاده از آمونیاک، در مقیاس وسیع به عنوان سوخت در توربین‌های گاز صنعتی برای تولید برق است.

به‌عنوان یک راه حل میانی برای رفع مشکلات احتراق آمونیاک خالص، استفاده از مخلوط آمونیاک و سایر سوخت‌هایی مانند هیدروژن [۹،۴] و متان [۵-۸] توسط محققان پیشنهاد شده است. این راهکار، می‌تواند مشخصه‌های احتراق آمونیاک را بهبود بخشد و همچنین، انتشار  $CO_2$  ناشی از احتراق سوخت‌های هیدروکربنی را کاهش دهد و منجر به گسترده‌تر شدن محدوده عملکردی و افزایش بازده احتراقی و حرارتی نسبت به احتراق آمونیاک خالص شود [۱۰]. همچنین، از آنجایی که گاز طبیعی یک سوخت پرآستفاده در توربین‌های گازی است، استفاده از مخلوط آمونیاک/متان به عنوان سوخت محفظه احتراق توربین‌های گازی موجود، یک راه بالقوه برای تسهیل استفاده از آمونیاک به عنوان سوخت جایگزین گاز طبیعی است.

دانش شیمیایی و فیزیکی مربوط به تعیین اثر افزودن آمونیاک به هیدروکربن و انتشار آلاینده‌ها (به ویژه اکسیدهای نیتروژن و گونه‌های اکسیداسیون جزئی مانند CO) بخصوص در مورد استفاده مخلوط سوخت در محفظه احتراق واقعی اندک است، اما تا بحال تلاش‌هایی نیز برای رسیدن به شناخت رفتار احتراقی و تولید آلاینده‌های مخلوط سوخت آمونیاک/متان انجام شده است که مرور کلیاتی از تجارب گذشته ضروری به نظر می‌رسد.

زیتونی و همکاران [۱۱] سرعت شعله‌ی آرام مخلوط آمونیاک/متان را مطالعه کرده و بیان کرده‌اند که سرعت شعله‌ی مخلوط آمونیاک/متان/ هوا متناسب با نسبت متان تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد، این افزایش نرخ واکنش به علت کاهش انرژی فعالسازی در رابطه‌ی آرنیوس است. فارغ از درصد متان موجود در سوخت، سرعت شعله از حالت رقیق از سوخت تا حدود نسبت هم‌ارزی استوکیومتریک افزایش و در شرایط غنی از سوخت، کاهش می‌یابد [۱۲،۷].

سرعت شعله در نزدیکی شرایط استوکیومتریک وابستگی شدیدی به درصد متان موجود در سوخت دارد که تغییرات شدید سرعت شعله، نشان دهنده آن است. همچنین، سرعت شعله با دمای واکنش‌دهنده‌ها، نسبت مستقیم و با فشار، نسبت معکوس دارد [۱۳،۱۲،۸].

دمای شعله‌ی آدیاباتیک نیز با افزایش نسبت متان موجود در سوخت، و همچنین، فشار افزایش می‌یابد که در نسبت‌های هم‌ارزی متفاوت، این روند مشابه است [۱۲-۱۴]. تفاوت دمای شعله‌ی آدیاباتیک، وابسته به نسبت متان موجود در سوخت، در شرایط استوکیومتری بیشترین مقدار است. بالا رفتن دمای شعله و نرخ آزادسازی حرارت با افزایش نسبت متان موجود در سوخت، نشان دهنده واکنش پذیری قوی‌تر متان نسبت به آمونیاک است [۱۴].

استفاده از آمونیاک به عنوان سوخت باعث ایجاد مشکل انتشار زیاد آلاینده‌ی NOx می‌شود. علاوه بر دو مکانیزم حرارتی و سریع<sup>۱</sup> که در محفظه فعال هستند، نیتروژن موجود در آمونیاک با اکسیژن واکنش داده و موجب تولید NOx می‌شود. لی و همکاران [۱۵] با مطالعات تجربی خود نشان دادند که افزایش مقدار NOx ناشی از وجود نیتروژن در آمونیاک، بر کاهش مقدار NOx ناشی از افت دمای احتراق آمونیاک غلبه دارد.

مشاهده شده است که افزایش نسبت آمونیاک در مخلوط سوخت، ابتدا باعث افزایش مقدار NOx شده و در نسبت مشخصی به بیشینه خود رسیده و سپس با افزایش بیشتر نسبت آمونیاک در سوخت، انتشار NOx نیز کاهش می‌یابد [۱۳]. ژانگ و همکاران [۱۶،۱۷] و آن و همکاران [۱۸]، بیان کرده‌اند که افزودن کمی متان به آمونیاک، خواص احتراقی آمونیاک را بهبود می‌بخشد، بدون آنکه مقدار آلاینده‌ی NOx زیاد شود ولی برای نسبت متان ۳۰٪ در مخلوط سوخت، بدلیل حضور کافی H, OH, HNO به مقدار زیاد NOx و CO انجامیده است.

بطور کلی شرایط غنی از سوخت برای کاهش NOx مناسب‌تر است، در حالی که احتراق ناقص را به همراه خواهد داشت و CO بیشتری تولید می‌کند. همچنین، بر خلاف احتراق متان/ هوا، احتراق آمونیاک/ هوا، در شرایط احتراقی رقیق از سوخت، NOx بالایی منتشر می‌کند و مخصوصاً در شرایط رقیق از سوخت، حتی با افزودن متان به آمونیاک، به‌عنوان مکمل سوخت، انتشار NOx بیشتر نیز می‌شود [۱۶]. و بنابراین، در احتراق آمونیاک، کنترل NOx موضوع کلیدی است و نیاز به روش‌هایی خاص برای کاهش آن است [۱۴،۷،۱]. همچنین، افزایش فشار، تولید CO و NOx را کاهش می‌دهد [۱۹]. انتشار NOx نسبت

<sup>۱</sup> Prompt

به CO، حساسیت بالاتری نسبت به فشار از خود نشان می‌دهد. علی‌رغم اینکه با افزایش فشار، دمای آدیباتیک شعله نیز زیاد می‌شود، اما کاهش انتشار NOx نشان می‌دهد که تاثیر فشار در تشکیل NO ناشی از سوخت، مهم‌تر از تشکیل NO با مکانیزم حرارتی است [۲۰،۱۳].

همچنین، نشان داده شده است که وقتی که درصد مولی آمونیاک در سوخت از ۶۰ درصد بیشتر می‌شود، انتشار CO<sub>2</sub> نسبت به احتراق متان خالص، به نصف کاهش می‌یابد. انتشار CO را نیز می‌توان با درصد جایگزینی بالای آمونیاک در مخلوط سوخت آمونیاک/متان کاهش داد [۱۴،۱۳].

والرا و همکاران [۲۱،۱]، بصورت تجربی آلاینده‌ها و پایداری شعله‌ی پیچشی آمونیاک/متان را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که روش پیش مخلوط سازی کامل سوخت بدلیل تفاوت خواص شیمیایی متان و آمونیاک، از نظر پایداری مطلوب نبوده و استراتژی مناسبی برای سوخت حاوی آمونیاک نیست. همچنین، نسبت آمونیاک در مخلوط سوخت و نسبت هم‌ارزی تاثیر زیادی بر روی تأخیر جرقه‌زنی<sup>۱</sup> مخلوط سوخت داشته و استفاده از مخلوط سوخت آمونیاک/متان منجر به تأخیر جرقه‌زنی زیادی نسبت به حالت متان خالص می‌شود. تأخیر زمانی جرقه‌زنی، با بالا رفتن نسبت هم‌ارزی افزایش می‌یابد، در حالی که با افزایش دما، فشار و نسبت متان موجود در سوخت کاهش می‌یابد که در آن، فشار و نسبت متان پارامترهای مهم‌تری هستند [۱۶،۹،۵]. نسبت آمونیاک موجود در سوخت، اثر غیرخطی در تأخیر زمانی جرقه‌زنی دارد. نرخ تغییر تأخیر زمان جرقه‌زنی، زمانی که درصد آمونیاک موجود در سوخت بیش از ۵۰ درصد مولی می‌شود، بیشتر است [۱۳].

باتوجه به مطالعات پیشین، مشخص است که دانش کنونی، بسیار کمتر از فهم لازم برای دستیابی به طراحی بهینه محفظه با قابلیت استفاده از آمونیاک است، درحالی که اشتیاق روزافزونی به تولید توان برپایه‌ی آمونیاک وجود دارد و بخصوص از آنجا که تا بحال به‌صورت جدی آمونیاک به عنوان سوخت مطرح نبوده است، شناخت کمی در مورد عملکرد محفظه‌های واقعی توربین گازی از جمله پایداری، پارامترهای عملکردی و تولید آلاینده‌ها در نسبت‌های مختلف آمونیاک/متان در مخلوط سوخت و بارگذاری‌های حرارتی مختلف محفظه وجود دارد.

بنابراین، هدف مطالعه حاضر، بررسی عملکرد و مقدار آلاینده‌های تولیدی یک محفظه احتراق میکروتوربین گازی در صورت استفاده از مخلوط سوخت آمونیاک/گاز طبیعی است. آزمایش‌ها در شرایط اتمسفریک انجام شده است و تأثیر نسبت آمونیاک به گاز طبیعی در مخلوط سوخت بر روی پارامترهای عملکردی محفظه از جمله، بازده محفظه، متغیر یکپارچگی توزیع دمای خروجی<sup>۲</sup>، مشخصات حرارتی محفظه یعنی توزیع دما در ناحیه ثانویه محفظه و خروجی آن و آلاینده‌های تولیدی محفظه، شامل NOx و CO بررسی شده است.

## موضع آزمون تجربی و روش‌های اندازه‌گیری

آزمایش‌های تجربی بر روی یک محفظه احتراق میکروتوربین گازی از نوع قوطی و احتراق غیرپیش‌آمیخته در موضع آزمون تجربی محفظه احتراق دانشگاه امیرکبیر انجام شده است. شماتیکی از موضع آزمون تجربی یعنی، سیستم تامین سوخت و هوا و آگزوز خروجی گازهای داغ محصولات احتراق، شامل لوله‌کشی‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری در شکل ۱ ارائه شده است. هوا با استفاده از یک دمنده‌ی سانتریفیوژی در شرایط اتمسفریک تامین شده و دبی هوا توسط یک رواتر با حداکثر ظرفیت ۳۰۰ مترمکعب بر ساعت، با دقت ۲٪ اندازه‌گیری می‌شود. برای تمام تست‌های انجام شده در این مطالعه، هوای ورودی به محفظه، در فشار ۱ بار مطلق و ۴۰ درجه سانتی‌گراد بوده است.

سوخت تزریق شده به محفظه نیز حاصل اختلاط مقدار مشخصی گاز شهری و آمونیاک است. دبی آمونیاک و گاز شهری پیش از اختلاط، با استفاده از رواترهایی با دقت به ترتیب ۰/۶ لیتر بر دقیقه و ۰/۸ لیتر بر دقیقه اندازه‌گیری می‌شود.

<sup>۱</sup> Ignition Delay Time

<sup>۲</sup> Pattern Factor

روتامترهای مربوط به آمونیاک و گاز شهری، به ترتیب برای گاز آمونیاک و گاز شهری کالیبر شده‌اند. فشار و دمای هوا و سوخت نیز با گیج خوردن و ترمومترهای مکانیکی اندازه‌گیری می‌شود. برای مشتعل کردن سوخت، یک مشعل جزقه‌زن پیش مخلوط هوا- بوتان در ناحیه اولیه‌ی محفظه قرار داده شده است که با مشتعل شدن محفظه، این جزقه‌زن حذف می‌شود. این جریان پیش مخلوط، خود توسط یک جزقه‌زن برقی مشتعل می‌شود. محصولات احتراق نیز پس از محفظه، وارد یک دودکش شده تا با عبور از یک مبدل حرارتی، پیش از خروج خنک شوند.

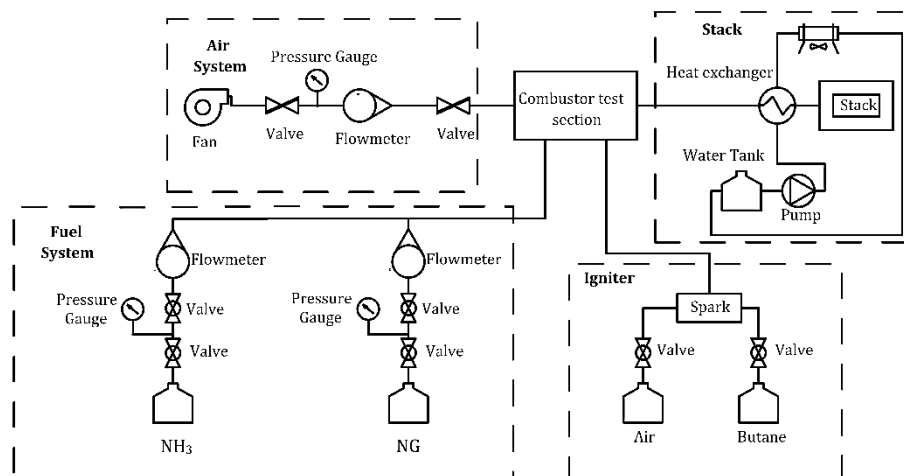


Figure 1- Test stand piping and instrumentation diagram  
 شکل ۱- نمودار ابزار دقیق و لوله‌کشی موضع آزمون تجربی

محفظه احتراق میکروتوربین گازی موجود در آزمایشگاه احتراق دانشگاه امیرکبیر، همانطور که در شکل ۲ الف دیده می‌شود، ۲۱۰ میلی‌متر طول داشته و ۷۴ میلی‌متر قطر دارد. این محفظه ۶ سوراخ برای تامین هوای ناحیه‌ی ثانویه‌ی محفظه و ۱۲ سوراخ برای تامین هوای ناحیه‌ی اولیه و ثانویه محفظه و سوراخ‌های ردیف دوم، وظیفه‌ی رساندن هوا به بخش رقیق‌سازی را برعهده دارند. خروجی محفظه نیز به شکل مستطیل با پهنای ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۵ میلی‌متر است. ورودی هوا به محفظه نیز چرخاننده‌ای با عدد پیچش ۰/۸۵ است که از ۲۰ عدد پره صاف با زاویه  $45^\circ$  تشکیل شده است.

همان‌طور که در شکل ۲ ب آورده شده است، انژکتور مورد استفاده در این آزمایش، انژکتوری پیچشی بوده است که مشابه چرخاننده‌ی هوا، به جریان سوخت هنگام تزریق، یک حرکت پیچشی می‌دهد. محور سوراخ‌ها با یکدیگر و با محور انژکتور موازی نیستند. سوراخ‌های انژکتور ۱۹ درجه به سمت بیرون منحرف شده و ۱۹ درجه نیز در جهت مماسی زاویه دارند. این انژکتور باعث حرکت جت سوخت در سه جهت شعاعی، مماسی و محوری می‌شود تا اختلاطی مناسب بین هوا و سوخت در ناحیه‌ی اولیه محفظه ایجاد کند.

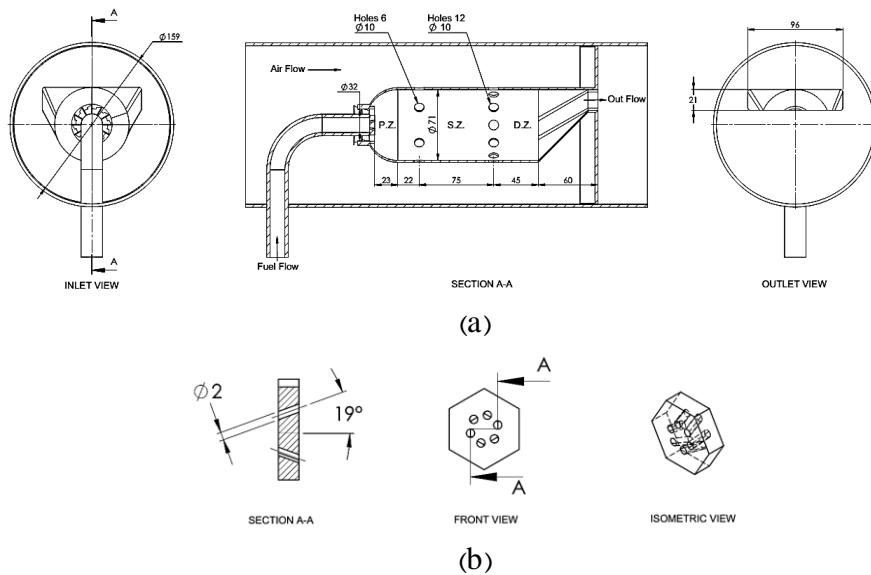


Figure 2- Geometry of test stand (a) combustion chamber and (b) fuel injector  
 شکل ۲- (الف) هندسه محفظه احتراق و (ب) انژکتور مورد استفاده در بستر آزمون

برای اندازه‌گیری دما داخل محفظه نیز از ترموکوپل‌های نوع k استفاده شد. این ترموکوپل‌ها برای بازه‌ی دمایی (۱۰۰ کلوین - ۱۶۵۰ کلوین) که محدوده‌ی مناسبی برای نقاط عملکردی محفظه است، با دقت  $2^\circ$  کالیبره شده‌اند. دما در ناحیه‌ی ثانویه‌ی محفظه (نقاط سیاه رنگ نشان داده شده در شکل ۳ الف) و همچنین روی خطی افقی در ارتفاع میانی خروجی محفظه اندازه‌گیری شده است (نقاط سیاه رنگ نشان داده شده در شکل ۳ ب). این ترموکوپل‌ها به یک داده بردار متصل شده‌اند که قادر است به‌طور همزمان داده‌های مربوط به ۲۴ ترموکوپل را به کامپیوتر منتقل کند و متوسط دمای خوانده شده توسط ترموکوپل‌ها برای ۹۰ ثانیه، به عنوان معیار دمای نقطه‌ی مورد نظر در آن شرایط عملکردی، در نظر گرفته می‌شود. ترموکوپل‌ها از آن جهت در ناحیه‌ی اولیه‌ی محفظه قرار داده نشده‌اند که وجود آن‌ها می‌تواند بر ساختار جریان اثرگذار بوده و شکل‌گیری جریان واکنشی را بهم بزند. برای اندازه‌گیری آلاینده‌های تولیدی محفظه از آنالیزور گاز Testo 350 XL در خروجی استفاده شده است. این آنالیزور می‌تواند نسبت مولی گونه‌های NO، NO<sub>2</sub> و CO را با دقت ۰/۱ PPM اندازه‌گیری کند.

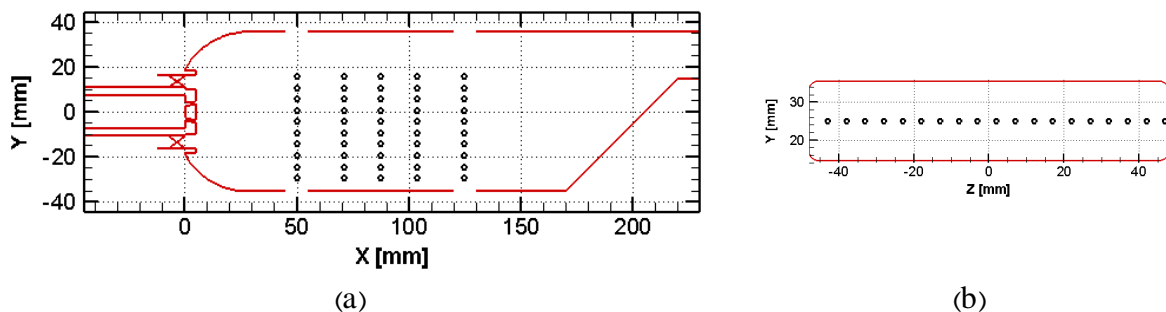


Figure 3- Temperature measurement points by thermocouples in (a) combustion chamber and (b) outlet  
 شکل ۳- نقاط اندازه‌گیری دما توسط ترموکوپل در محفظه احتراق، (الف) داخل محفظه (ب) خروجی

## شرایط نقاط تست تجربی

در این مطالعه تجربی، توزیع دمای ناحیه‌ی ثانویه‌ی محفظه احتراق در تمام نقاط نشان داده شده در شکل ۳، برای تعیین اثر نسبت آمونیاک/ متان موجود در سوخت در دو توان حرارتی مختلف بر عملکرد محفظه اندازه‌گیری می‌شود. دبی هوا و دبی آمونیاک و گاز شهری به‌عنوان اجزای مخلوط سوخت و همچنین، توان حرارتی و نسبت هم‌ارزی متناظر هر نقطه تست تجربی در جدول ۲ گزارش شده است.

تست‌ها برای نسبت آمونیاک ۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ در مخلوط سوخت و دو توان حرارتی ۱۲/۱ کیلووات و ۹/۷ کیلووات انجام شده است. در تمام این تست‌ها، نسبت هم‌ارزی یکسان و برابر ۰/۱۷ نگه‌داشته شده است تا بتوان مقایسه بهتری بر روی نتایج انجام داد.

جدول ۱- مشخصات نقاط تست تجربی

Table 1- Experimental test points conditions

Operating Point	Air Flow Rate (Nm <sup>3</sup> /hr.)	Natural Gas Fuel Flow Rate (NL/min)	Ammonia Fuel Flow Rate (NL/min)	Overall Equivalence ratio	Thermal Power (kw)
I	80	20 (100%)	0 (0%)	0.17	12.1
II	80	17 (70%)	8 (30%)	0.17	12.1
III	75	16 (60%)	11 (40%)	0.17	12.1
IV	75	14 (50%)	16 (50%)	0.17	12.1
V	65	16 (100%)	0 (0%)	0.17	9.7
VI	60	13 (70%)	6.5 (30%)	0.17	9.7
VII	60	12 (60%)	10 (40%)	0.17	9.7
VIII	60	11 (50%)	13 (50%)	0.17	9.7

## نتایج

نتایج مربوط به تست‌های تجربی انجام شده، در ادامه ارائه می‌شوند. در ابتدا، توزیع دمای داخل ناحیه‌ی ثانویه‌ی محفظه گزارش می‌شود که با ترموکوپل اندازه‌گیری شده است. سپس، آلاینده‌های اندازه‌گیری شده در خروجی محفظه شامل NO<sub>x</sub> و CO در نقاط تست تجربی بیان شده و در انتها نیز، پارامترهای عملکردی محفظه شامل بازده احتراقی محفظه، متغیر یکپارچگی توزیع دمای خروجی و متوسط دمای خروجی محفظه ارائه شده و برای نقاط عملکردی مختلف محفظه مقایسه می‌شوند.

## توزیع دما

شکل ۴، کانتور دمایی ناحیه‌ی ثانویه‌ی محفظه را در هریک از نقاط تست تجربی جدول ۱ نشان می‌دهد. شکل ۵ نیز دماهای اندازه‌گیری شده را برای نسبت‌های مختلف آمونیاک/ متان به‌صورت پروفایلی نشان می‌دهد تا بتوان مقایسه بهتری بین آن‌ها انجام داد.

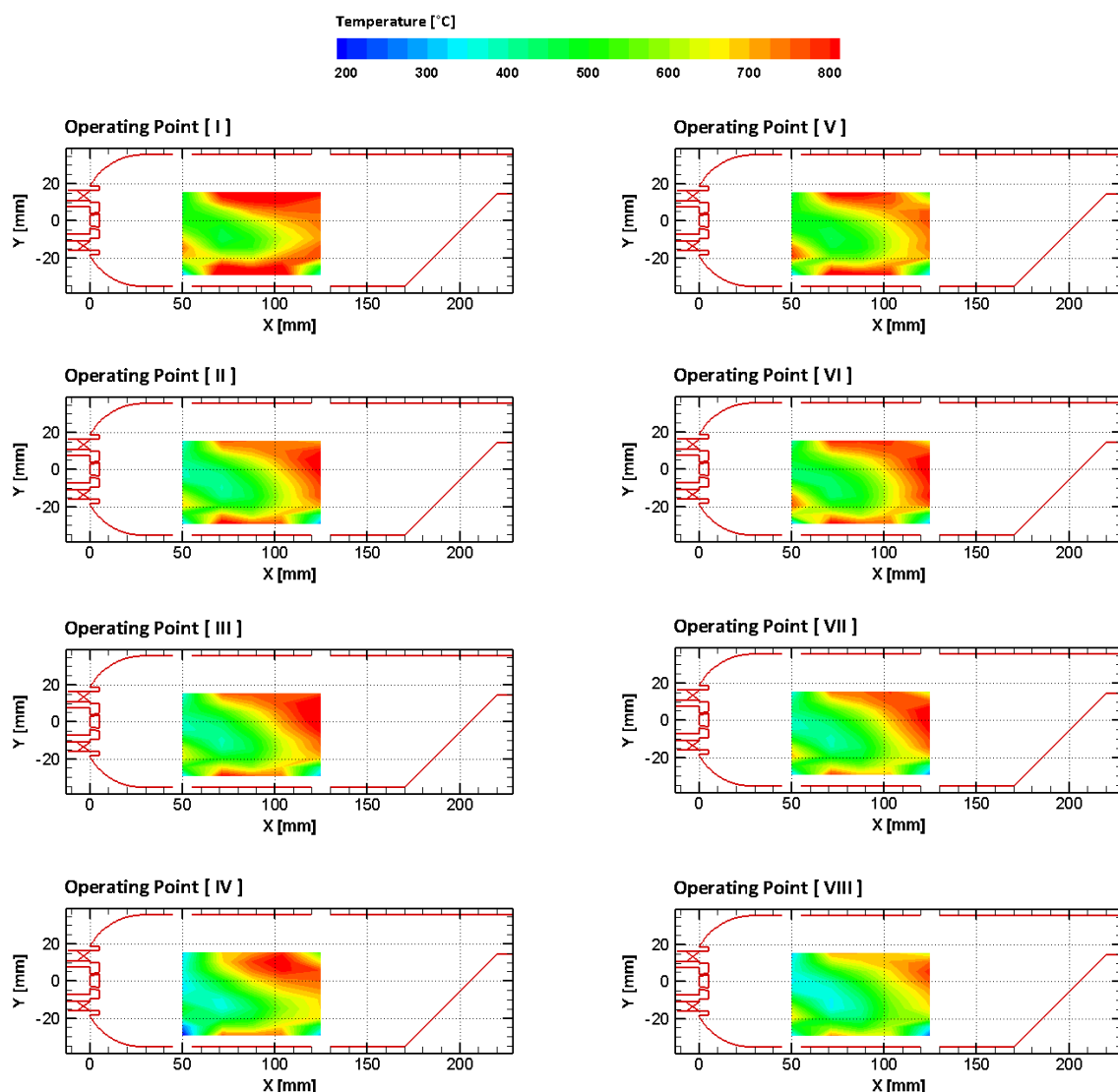


Figure 4- Temperature contours of combustor secondary zone at operating points of Table 1

شکل ۴- کانتور دمای ناحیه‌ی ثانویه‌ی محفظه در شرایط تست جدول ۱

در تمام نقاط عملکردی تست تجربی که در جدول ۱ گزارش شده‌اند، احتراق پایداری در محفظه ایجاد شد. در تمام نقاط تست تجربی، شعله عموماً در نزدیکی لاینر محفظه تشکیل شده است و در مرکز محفظه، دما افت می‌کند. این امر، بخاطر شکل جریان ایجاد شده ناشی از وجود چرخاننده است که باعث باز شدن جریان به سمت دیواره‌های لاینر می‌شود و در این هندسه‌ی محفظه غیرقابل اجتناب است. بدلیل نزدیکی جریان دما بالا به لاینر، دیواره‌های لاینر دمای بیشتری را به نسبت نواحی مرکزی محفظه احساس می‌کنند. این امر از نظر سازه‌ای مطلوب نیست، چرا که منجر به تنش‌های حرارتی بیشتری روی لاینر شده و عمر محفظه را کاهش و هزینه‌ی نگهداری آن را افزایش می‌دهد. بنابراین، باید از تکنیک مناسب‌تری برای خنک‌کاری محفظه جهت جلوگیری از سوختن لاینر استفاده شود.

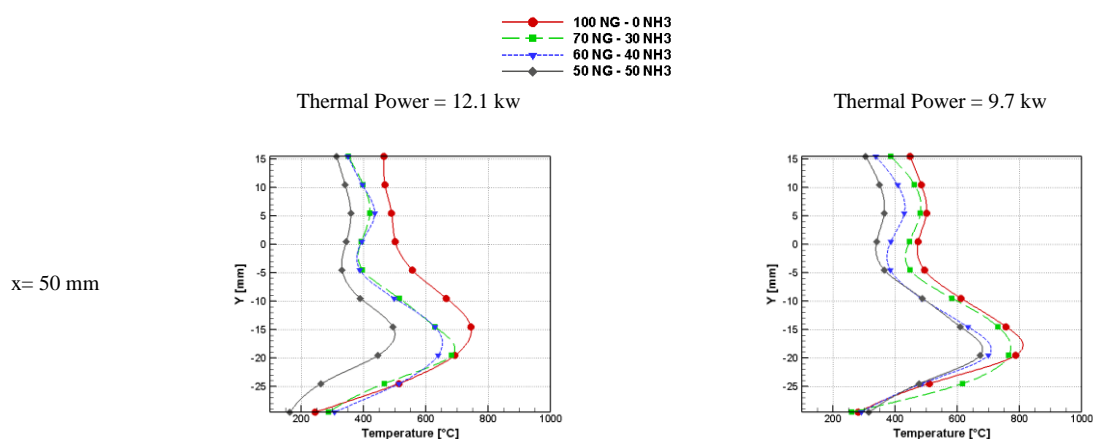
از طرف دیگر، با مقایسه توزیع دمایی مربوط به نقاط تست مختلف، روشن است که با افزایش نسبت آمونیاک، دمای شعله، در اکثر نقاط محفظه افت محسوسی کرده است. همانطور که در نمودار پروفایلی شکل ۵ مشخص است، برای ترموکوپل واقع در مقطع  $x=71$  میلی‌متر و در نزدیکی لاینر که بیشینه‌ی دما را ثبت کرده است، این مقدار برای توان حرارتی ۱۲/۱

کیلووات در نسبت‌های آمونیاک/گاز طبیعی ۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد به ترتیب برابر ۹۷۰، ۸۷۰، ۸۴۰ و ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد و برای توان حرارتی ۹/۷ کیلووات به ترتیب برابر ۹۰۰، ۸۵۰، ۸۰۰ و ۷۴۰ درجه سانتی‌گراد است که افت دمایی به طور متوسط ۵٪ را نشان می‌دهد، این افت حرارت را می‌توان مربوط به نرخ واکنش پایین‌تر آمونیاک نسبت به متان مربوط دانست که به تبع آن، نرخ آزادسازی حرارت نیز پایین‌تر خواهد بود.

در شکل ۴ نیز همچنین مشخص است که با افزایش نسبت آمونیاک، ناحیه‌ی دما بالا، محدودتر و کوچک‌تر می‌شود که نشان از افت شدت حرارت تولیدی بواسطه افت نرخ واکنش‌ها با افزایش نسبت آمونیاک در مخلوط سوخت است. ناحیه‌ی دما بالای تشکیل شده در ناحیه‌ی اولیه محفظه که در شرایط سوخت تماماً گاز طبیعی (نسبت آمونیاک ۰٪) کاملاً قابل مشاهده است و تا ناحیه ثانویه کشیده است، با افزایش نسبت آمونیاک از بین می‌رود. بنابراین، ناحیه‌ی احتراقی درون محفظه با افزایش نسبت آمونیاک، در ناحیه‌ی اولیه بسیار تضعیف شده و احتراق مخلوط سوخت با نسبت‌های بالاتر آمونیاک، عموماً در انتهای ناحیه ثانویه انجام می‌شود. این ناحیه‌ی دما بالا با افزایش نسبت آمونیاک از جلوی محفظه فاصله گرفته و بیشتر در سمت انتهایی محفظه تمرکز پیدا می‌کند. این اتفاق در نمودار پروفایلی شکل ۵ کاملاً مشخص است که در ترموکوپل واقع در مقطع  $x=103$  میلی‌متر، دمای ثبت شده برای نسبت‌های مختلف آمونیاک/متان بسیار نزدیک یکدیگر است، البته در این مقطع نیز با نزدیک شدن به لاینر اختلاف دمایی مشهودتر شده و دمای ثبت شده با افزایش نسبت آمونیاک، کم می‌شود.

ولی برای ترموکوپل  $x=125$  میلی‌متر، حتی مقادیر دمایی ثبت شده برای نسبت‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ آمونیاک، بیشتر از حالت بدون آمونیاک است که نشان‌دهنده به تأخیر افتادن احتراق با افزایش نسبت آمونیاک بدلیل نرخ واکنش پایین آن است، البته در تمام مقاطع، دمای ثبت شده برای نسبت آمونیاک ۵۰٪، در مقایسه با دیگر نسبت‌ها کمتر است که می‌تواند به علت عدم شکل‌گیری احتراق مناسب و افت عملکرد محفظه به دلیل کاهش شدید نرخ واکنش باشد. تأخیر احتراق، سبب برخورد جبهه شعله با هوای سرد ورودی از سوراخ‌های هوای رقیق‌سازی در ابتدای ناحیه رقیق‌سازی می‌شود. بدترین شرایط برای توان حرارتی ۹/۷ کیلووات است که با افت توان، مسأله‌ی احتراق ناکامل تشدید شده و تأخیر احتراق با برخورد جریان وکنشی با جریان هوای سرد رقیق‌سازی همراه شده و افت شدید دما را به همراه دارد که در افت دمایی خروجی دیده خواهد شد.

به‌صورت کلی، برای توان حرارتی ۹/۷ کیلووات نسبت به توان حرارتی بالاتر ۱۲/۱ کیلووات، رفتار یکسانی مشاهده می‌شود ولی شدت تغییرات دمایی کمتر بوده و دمای ثبت شده برای نسبت‌های مختلف آمونیاک/متان به یکدیگر نزدیک‌تر است.





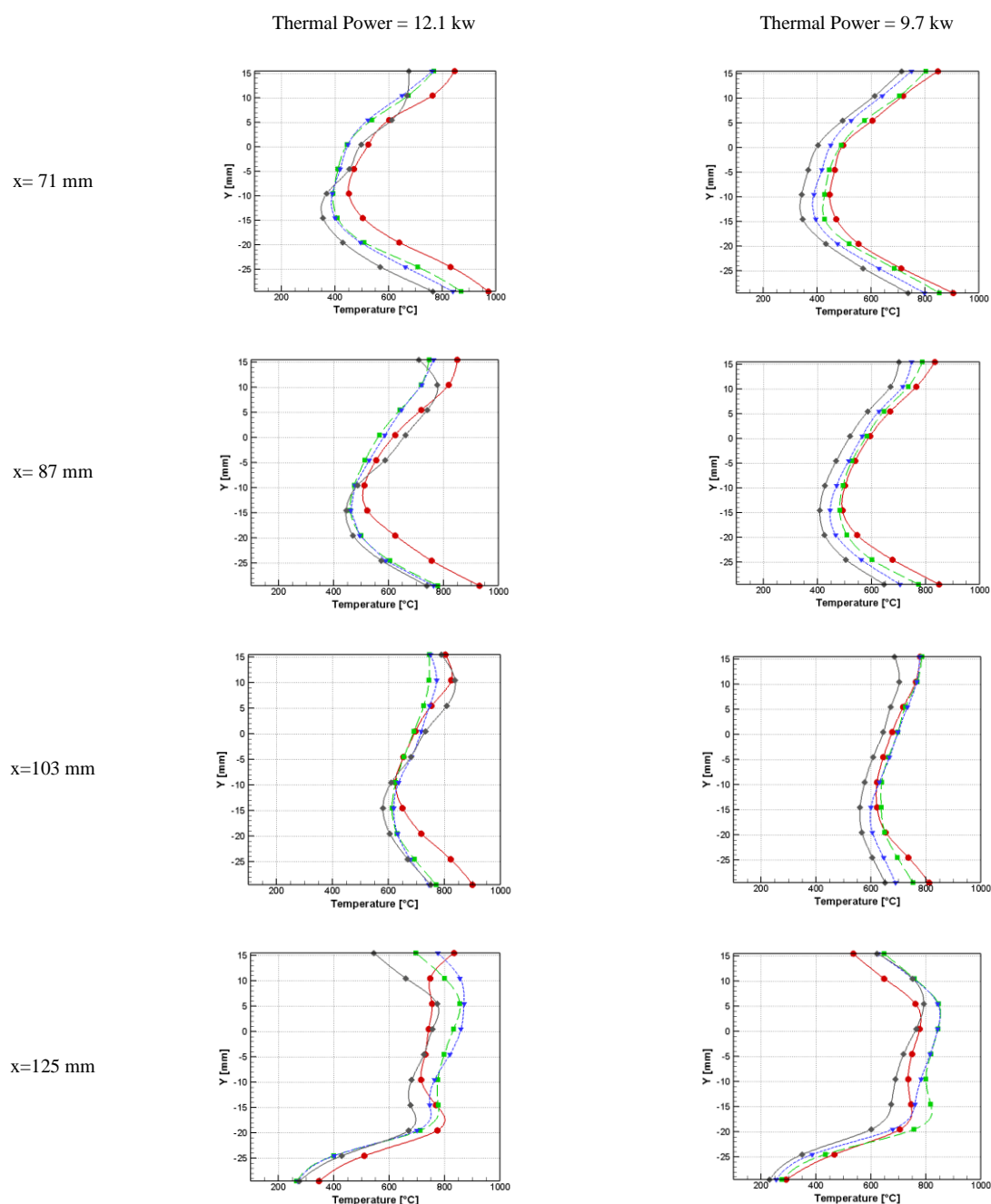


Figure 5- Temperature profile measured at different sections of the secondary zone of combustion chamber at operating points of Table 1

شکل ۵- پروفیل دمایی اندازه گیری شده در مقاطع مختلف ناحیه ثانویه محفظه در شرایط تست جدول ۱

### آلاینده‌ها

آلاینده‌های اندازه‌گیری شده در این تست تجربی شامل  $NO_x$  (مجموع مقادیر  $NO$  و  $NO_2$ ) و  $CO$  است که به تفصیل در ادامه خواهند آمد.

### آلاینده‌ی NO<sub>x</sub> (NO,NO<sub>2</sub>)

چهار مکانیزم اصلی در تشکیل آلاینده NO<sub>x</sub> (در این مطالعه مجموع مقادیر دو آلاینده‌ی NO و NO<sub>2</sub> مدنظر است)، در سیستم‌های احتراقی دخالت دارند. اولین و مهم‌ترین آن‌ها در احتراق سوخت‌های فسیلی رایج مانند گاز شهری، مکانیزم NO حرارتی است که نرخ تولید NO<sub>x</sub> در این روش فقط در نواحی بسیار داغ (بیشتر از ۱۸۰۰ کلوین) بالاست. این مکانیزم بسیار وابسته به دما ولی مستقل از نوع سوخت است. همچنین نرخ تولید آن وابسته به زمان اقامت جریان نیز است [۲۲].

دومین منبع تولید NO، مکانیزم NO سریع است که در نواحی با غلظت بالای سوخت، دمای پایین و زمان اقامت کوتاه اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. گونه‌های حاصل از شکست مولکول‌های سوخت آلکانی، منبع مکانیزم سریع شناخته شده و مسیر واکنشی آن شامل تولید HCN است و متعاقباً به NCO، NH، N و در نهایت به NO تبدیل می‌شود. نرخ تولید NO<sub>x</sub> در این روش وابسته به تراکم اتم‌های کربن موجود و مستقل از نوع سوخت اصلی است. مقدار HCN تشکیل شده نیز با افزایش غلظت رادیکال‌های هیدروکربنی که خود متناسب با نسبت هم‌ارزی است، زیاد می‌شود [۲۳].

مکانیزم دیگری که منجر به تولید NO<sub>x</sub> شده، از مسیر اکسیداسیون NO<sub>2</sub> است. این مکانیزم در شرایط غنی از اکسیژن و فشارهای بالا فعال است و در صورت پایین بودن فشار، تاثیر این مکانیزم ناچیز خواهد بود [۲۴].

اما مکانیزم دیگری که با افزودن آمونیاک به سوخت، اهمیت زیادی پیدا می‌کند، NO<sub>x</sub> ناشی از نیتروژن موجود در سوخت است که می‌تواند NO<sub>x</sub> کلی تشکیل شده در طول فرآیند احتراق را شدیداً افزایش دهد [۲]. در مخلوط سوخت گاز طبیعی نیز مقدار کمی نیتروژن موجود است که ابتدا به هیدروژن سیانید تبدیل شده و در ادامه فرآیند، از مکانیزم سریع برای تولید NO پیروی می‌کند. در صورت حضور آمونیاک که حاوی ۸۰ درصد وزنی نیتروژن است، نیتروژن موجود در مولکول آمونیاک، منبع مهمی برای انتشار اکسید نیتروژن است.

شکل ۶، آلاینده NO<sub>x</sub> تولیدی محفظه را برای نقاط تست تجربی مختلف مطابق جدول ۱، برای نسبت‌های مختلف آمونیاک/متان و در دو توان حرارتی متفاوت نشان می‌دهد. برای توان حرارتی ۱۲/۱ کیلووات، مقدار NO<sub>x</sub> از ۱۰ PPM برای شرایط مصرف ۱۰٪ گاز طبیعی با افزودن آمونیاک، به شدت افزایش یافته و در نسبت ۴۰٪ آمونیاک، به بیشینه مقدار خود یعنی ۴۴۰ PPM رسیده و سپس، در نسبت ۵۰٪ آمونیاک به ۴۲۰ PPM کاهش می‌یابد. برای توان حرارتی ۹/۷ کیلووات روند مشابهی در مقدار NO<sub>x</sub> مشاهده می‌شود، اگرچه مقادیر NO<sub>x</sub> برای این توان حرارتی، در حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد کمتر از مقادیر NO<sub>x</sub> در توان حرارتی ۱۲/۱ کیلووات است. در این توان حرارتی، در شرایط مصرف ۱۰٪ گاز طبیعی، مقدار NO<sub>x</sub> در حدود ۶ PPM است که در نسبت آمونیاک ۴۰٪ به بیشینه مقدار خود برابر ۳۸۰ PPM رسیده و در نسبت ۵۰٪ آمونیاک، به ۳۰۰ PPM کاهش می‌یابد.

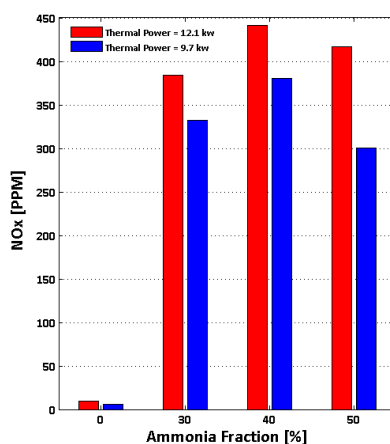
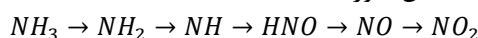
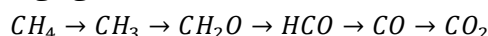


Figure 6- NO<sub>x</sub> (NO+NO<sub>2</sub>) emission of combustor  
شکل ۶- آلاینده NO<sub>x</sub> (NO+NO<sub>2</sub>) تولیدی در محفظه

مسیر تبدیل آمونیاک به NO/NO<sub>2</sub> بدین صورت است،



متان نیز در مسیر اکسیداسیون و تبدیل شدن به CO/CO<sub>2</sub>، مسیر زیر را طی می‌کند.



متان توسط رادیکال‌های OH و H، هیدروژن‌زدایی شده و به CH<sub>3</sub> تبدیل می‌شود. رادیکال متیل (CH<sub>3</sub>) می‌تواند از مسیرهای متفاوتی، رادیکال‌های متانول یا CH<sub>2</sub>(s) یا مستقیماً فرمالدهید (CH<sub>2</sub>O) را تولید کند. این مسیرها مکمل یکدیگرند و از طریق گونه‌های میانی، متانول و CH<sub>2</sub>(s) به فرمالدهید تبدیل می‌شوند. متعاقباً، فرمالدهید به سرعت با هیدروژن‌زدایی به رادیکال‌های فرمیل (HCO) و سپس CO تبدیل شده و با اکسید شدن به CO<sub>2</sub> تبدیل می‌شود [۲۵].

مسیرهای اکسیداسیون گونه‌های کربنی و نیتروژنی به صورت کلی از هم جدا هستند. (اگرچه، یک برهمکنش سینتیکی بسیار جزیی در واکنش رفت و برگشتی NO-NO<sub>2</sub> وجود دارد و گونه‌های رادیکال CH<sub>3</sub> در تبدیل NO<sub>2</sub> به NO کمک می‌کنند.) تولید NO<sub>x</sub> کاملاً وابسته به شیمی اکسیداسیون آمونیاک است. تحلیل مسیرهای تشکیل NO<sub>x</sub> برای احتراق متان خالص، همانطور که در [۲۷،۲۶] نیز گزارش شده است، نشان داده است که NO<sub>x</sub> عمدتاً از مکانیزم سریع تولید می‌شود. ولی برای سوخت مخلوط آمونیاک/متان به طور خاص، می‌توان بیان کرد که مکانیزم سریع نقش مهمی ندارد و تشکیل NO<sub>x</sub> ناشی از وجود نیتروژن در آمونیاک چنین مسیرهای تشکیل NO<sub>x</sub> را که مربوط به مورد متان خالص است، کاهش می‌دهد.

برهمکنش بین واکنش‌های شیمیایی کربن و نیتروژن و تأثیر آن بر تشکیل NO<sub>x</sub> را می‌توان با در نظر گرفتن مکانیسم‌های شاخه‌ای ۱ شدن توضیح داد. در سوخت مخلوط آمونیاک/متان، اکسیداسیون آمونیاک عمدتاً توسط واکنش‌های شاخه‌ای دمای بالای H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> یعنی توسط واکنش (H+O<sub>2</sub>=OH+O) و (H<sub>2</sub>O+O=2OH) حفظ می‌شود. سپس، هر دو گونه‌ی کربنی (HCO) و گونه‌های نیتروژنی (HNO، NO<sub>2</sub> و NH<sub>2</sub>) در تولید رادیکال‌های OH و HO<sub>2</sub> شرکت می‌کنند.

تعامل بین واکنش‌های شیمیایی اکسیداسیون را می‌توان با در نظر گرفتن نرخ مصرف رادیکال نیز درک کرد. شایان ذکر است که سرعت واکنش NH<sub>3</sub>+OH=NH<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O همیشه سریع‌تر از واکنش CH<sub>4</sub>+OH=CH<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>O است. بنابراین، آمونیاک به سرعت رادیکال‌های OH را مصرف می‌کند [۲۸] که به نوبه خود، عمدتاً از اکسیداسیون متان حاصل می‌شوند.

به طور کلی، مسیرهای اکسیداسیون متان، نقش پررنگ‌تری در تأمین گونه‌های رادیکالی دارند. بنابراین، با افزایش درصد متان، غلظت رادیکال OH افزایش می‌یابد، در حالی که رادیکال‌های NH<sub>2</sub> کاهش می‌یابد. علاوه بر این، غلظت بالاتر OH مصرف NH<sub>2</sub> و تبدیل آن را به NO افزایش می‌دهد و واکنش‌های کاهش NO را کمتر می‌کند (NH<sub>2</sub>+NO=N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O). در نتیجه، وجود متان در مخلوط سوخت آمونیاک/متان، باعث می‌شود درصد تبدیل رادیکال NH<sub>2</sub> به NO در مقابل تبدیل رادیکال NH<sub>2</sub> به سایر گونه‌ها، افزایش یابد [۲۹].

به طور خاص، مستقل از غلظت رادیکال NH<sub>2</sub> و بنابراین درصد آمونیاک، هر چه غلظت OH بالاتر باشد، امکان تبدیل NH<sub>2</sub> به NO بالاتر است. این رفتار، نقش کلیدی رادیکال‌های OH را در تقویت تشکیل NO<sub>x</sub> در هنگام استفاده از مخلوط‌های آمونیاک/متان نشان می‌دهد و افزایش شدید انتشار NO<sub>x</sub> را حتی با وجود مقادیر کم آمونیاک، توضیح می‌دهد. بنابراین، می‌توان گفت که افزایش غلظت رادیکال OH موجب انتشار بیشتر NO<sub>x</sub> در درصدهای پایین‌تر نسبت به مواردی است که درصد آمونیاک زیاد یا نزدیک به آمونیاک خالص است [۲۵].

شکل ۶ برای سوخت مخلوط آمونیاک/متان در غلظت آمونیاک پایین، تغییر شدید سطوح انتشار NO<sub>x</sub> را نشان می‌دهد. این نتایج، نقش مهم آمونیاک در تولید NO<sub>x</sub> را نیز در درصدهای بسیار کم آمونیاک در مخلوط سوخت و برهمکنش بین کربن

<sup>1</sup> branching

و نیتروژن شیمیایی به دلیل تولید رادیکال OH را تأیید می‌کند. همچنین، به دلیل کاهش دما و به تبع کاهش نرخ واکنش‌ها در توان حرارتی پایین‌تر، همان‌طور که انتظار می‌رود مقدار NOx تولیدی نیز کم می‌شود.

### آلاینده CO

همانطور که در بخش آلاینده NOx ذکر شد، فرآیند اکسیداسیون آلکان‌ها را می‌توان به دو گام اصلی تقسیم کرد، آلکان به کربن مونوکسید تبدیل شده و در ادامه، در اثر اکسیداسیون، CO به CO<sub>2</sub> تبدیل می‌شود. گونه CO که یک گونه میانی قلمداد می‌شود، حاصل احتراق ناقص بدلیل زمان اقامت جریان ناکافی، عدم اختلاط مناسب سوخت و هوا و یا خاموشی موضعی شعله است. گونه CO در نواحی با غلظت بالای سوخت، با شدت بیشتری تشکیل می‌شود. وجود چنین نواحی با غلظت بالای سوخت در احتراق غیرپیش آمیخته، اجتناب ناپذیر است. بنابراین، برای این روش احتراقی، زمان اقامت کافی برای جریان باید در نظر گرفته شود.

عامل دیگری که در بخش قبل نیز به آن اشاره شد، رقابت واکنش‌های شیمیایی کربنی و نیتروژنی در مصرف رادیکال‌های OH است. همانطور که ذکر شد، رادیکال OH عموماً در مسیر اکسیداسیون متان تولید شده ولی توسط گونه‌های نیتروژنی نیز مصرف می‌شود و این خود عاملی برای عدم تکمیل زنجیره واکنشی گونه کربنی و بالا رفتن مقدار CO خروجی از محفظه است. بنابراین، با افزودن آمونیاک به سوخت و علی‌رغم کاهش نسبت متان در سوخت، این مقدار کاهش نمی‌یابد.

شکل ۷، مقدار آلاینده CO خروجی از محفظه احتراق را در نقاط مختلف تست تجربی جدول ۱ نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۷ مشخص است، آلاینده‌ی CO مربوط به این محفظه در شرایط استفاده ۱۰۰ درصدی از گاز طبیعی، نیز بالا است و برای توان حرارتی ۱۲/۱ کیلووات، برابر ۵۲۰ PPM و برای توان حرارتی ۹/۷ کیلووات در حدود ۴۷۰ PPM است. در توان حرارتی ۱۲/۱ کیلووات، با افزودن آمونیاک به مخلوط سوخت، مقدار این آلاینده ابتدا تا نسبت آمونیاک ۴۰ درصد، اندکی افزایش یافته و در مقدار بیشینه به ۵۶۰ PPM می‌رسد و سپس، روند کاهشی شده و در نسبت ۵۰ درصد آمونیاک به مقدار ۵۵۰ PPM می‌رسد. برای توان حرارتی ۹/۷ کیلووات، مقدار CO برای شرایط سوخت گاز طبیعی ۱۰۰ درصد و نسبت آمونیاک، ۳۰ و ۴۰ درصد، نسبتاً برابر و در حدود ۴۷۰ PPM است ولی در نسبت آمونیاک ۵۰ درصد، به مقدار ۴۱۰ PPM کاهش می‌یابد.

باید توجه داشت که با افزایش نسبت آمونیاک در مخلوط سوخت، عملاً مقدار متان در مخلوط سوخت کم می‌شود، بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش نسبت آمونیاک با فرض عدم تغییر عملکرد محفظه، شدت CO خروجی کاهش یابد ولی همانطور که در شکل ۷ دیده می‌شود، این اتفاق نمی‌افتد. پس می‌توان گفت در عمل با افزایش نسبت آمونیاک، عملکرد احتراقی واکنش شیمیایی متان نیز افت داشته و احتراق ناقص متان با افزایش نسبت آمونیاک در مخلوط سوخت، رو به فزونی است. همانطور که در ابتدای بخش گفته شد، رقابت واکنش شیمیایی کربنی و نیتروژنی در مصرف رادیکال OH از یک سمت و همچنین، افت دمای محفظه از سوی دیگر، دو عامل تأثیرگذار در مقدار CO تولیدی محفظه است که هر دو این عوامل باعث بالا نگه داشته شدن مقدار CO تولیدی محفظه، علی‌رغم کاهش نسبت متان در سوخت با افزایش نسبت آمونیاک هستند. در نقاط تست تجربی VIII و IV که نسبت آمونیاک در مخلوط سوخت ۵۰٪ است، اثر عملکرد متضاد این دو عامل دیده می‌شود که علی‌رغم افت دمای محفظه (شکل ۴، ۵ و ۸) ولی مقدار CO خروجی به ترتیب نسبت به نقطه تست تجربی VII و III کاهش یافته است. این کاهش مقدار CO مطابق با روند تغییر نسبت متان در مخلوط سوخت و همچنین، تغییرات NOx است و هم‌زمان با کاهش فعالیت واکنش شیمیایی نیتروژنی، مقدار CO نیز کاهش می‌یابد.

همچنین، در توان حرارتی بالاتر، به دلیل افزایش نرخ واکنش‌ها و مطابق با روند تغییر NOx، مقدار CO نیز بیشتر است که به دلیل افت عملکرد واکنش شیمیایی کربنی در محفظه است. این روند با روند تشکیل آلاینده‌ی NOx در تطابق است. بنابراین، افزودن آمونیاک علاوه بر اینکه مشکل NOx بالا را سبب شده است، در واکنش شیمیایی کربنی اختلال ایجاد کرده و

مقدار CO را بالا نگه داشته است. می توان تخمین زد که روند تشکیل CO<sub>2</sub> برخلاف روند CO است. واکنش غالب تبدیل CO به CO<sub>2</sub>، معادله CO+OH=CO<sub>2</sub>+H است. مقدار CO بالاتر به معنای بازده احتراق کمتر و انتشار CO<sub>2</sub> پایین تر است که محصول احتراق کامل است.

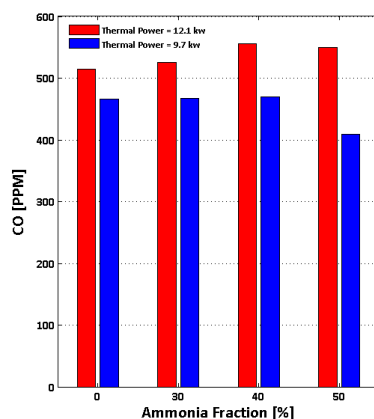


Figure 7- CO emission of combustor  
شکل ۷- CO تولیدی در محفظه

## پارامترهای عملکردی

برای ارزیابی عملکرد محفظه، دو پارامتر بازده احتراق و متغیر یکپارچگی توزیع دمای خروجی و همچنین، دمای خروجی از محفظه بررسی می شوند.

شکل ۸، مقایسه‌ی بین دمای متوسط خروجی محفظه در نقاط تست تجربی ذکر شده در جدول ۱ برای نسبت‌های مختلف آمونیاک/ متان در مخلوط سوخت در دو توان حرارتی مختلف است. در توان حرارتی ۱۲/۱ کیلووات، با تغییر نسبت آمونیاک در سوخت، تغییرات دمایی آنچنانی به چشم نمی‌آید و علی‌رغم نوسانات، ولی دمای خروجی در حدود ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد است. این امر باتوجه به اینکه، توان حرارتی و نسبت هم‌ارزی در محفظه برای تمام نقاط ثابت نگه داشته شده است، دور از انتظار نیست.

البته باید توجه داشت که ثابت بودن دمای خروجی، در شرایطی است که دبی هوای ورودی برای نسبت‌های آمونیاک بالاتر، کاهش می‌یابد که اثر این کاهش دبی هوا در بازده احتراق دیده خواهد شد. این کاهش دبی به منظور ثابت نگه داشتن نسبت هم‌ارزی برای نسبت‌های مختلف آمونیاک در مخلوط سوخت است، زیرا باتوجه به معادله شیمیایی کلی احتراق آمونیاک و متان ( $1 \text{ CH}_4 + 2 \text{ O}_2 = 1 \text{ CO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O}$ ,  $4 \text{ NH}_3 + 3 \text{ O}_2 = 2 \text{ N}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$ )، واضح است که در نسبت هم‌ارزی ثابت، آمونیاک نسبت به متان، به مقدار هوای کمتری نیاز دارد.

در توان حرارتی ۹/۷ کیلووات برای شرایط ۱۰۰ درصد گاز طبیعی و همچنین، نسبت آمونیاک ۳۰٪ و حتی ۴۰٪، دمای خروجی علی‌رغم مقداری کاهش، در حدود ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد است که روند آن مشابه توان حرارتی ۱۲ کیلووات بوده ولی مقدار آن به دلیل پایین تر بودن توان حرارتی، کمتر است. برای نسبت آمونیاک ۵۰٪ در مخلوط سوخت، دمای خروجی به شدت افت کرده و به ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این افت دما نشان دهنده عدم احتراق مناسب در محفظه است و نزدیک شدن محفظه به حالت خاموشی است.

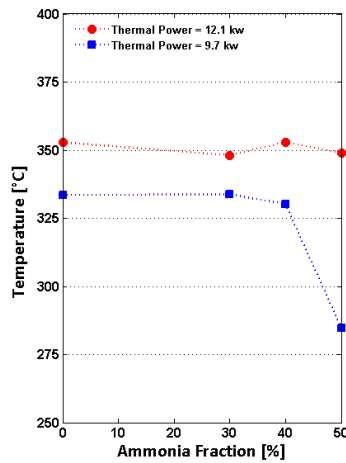


Figure 8- Combustor outlet temperature  
شکل ۸- توزیع دمای خروجی از محفظه

شکل ۹، بازده احتراق محفظه را برای نقاط مختلف تست تجربی جدول ۱ نشان می‌دهد. پارامتر بازده احتراق براساس رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود [۳۰].

$$\eta_{\text{combustion}} = \frac{c_p (T_{\text{exit}} - T_{\text{inlet}}) \dot{m}_{\text{air}}}{\dot{m}_{\text{fuel}} LHV_{\text{fuel}}} \quad (1)$$

در این رابطه،  $C_p$  ظرفیت حرارتی هوا در فشار ثابت،  $T_{\text{exit}}$  دمای متوسط در خروجی محفظه،  $T_{\text{inlet}}$  دمای هوای ورودی به محفظه،  $\dot{m}$  دبی جرمی و  $LHV_{\text{fuel}}$  ارزش حرارتی پایین مخلوط سوخت مورد استفاده است. در نمودار مشخص است که با افزایش درصد آمونیاک در هر دو توان، بازده احتراقی محفظه افت می‌کند و از این جهت، افزودن آمونیاک اثری نامطلوب بر عملکرد محفظه داشته است. این افت برای توان حرارتی ۱۲/۱ کیلووات در حدود ۶ درصد و برای توان حرارتی ۹/۷ کیلووات در حدود ۱۵ درصد است. همچنین در شکل ۹ دیده می‌شود که در توان حرارتی پایین‌تر محفظه، بازده محفظه کمتر است که این خود بدلیل پایین‌تر بودن دمای خروجی در همان نقطه کاری است.

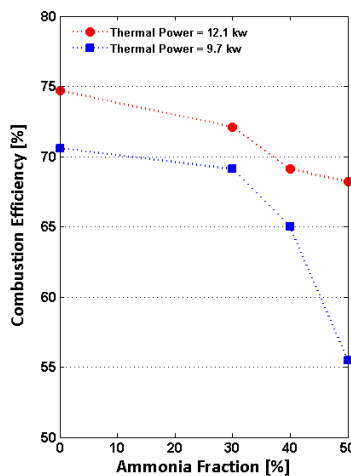


Figure 9- Combustor efficiency  
شکل ۹- بازده محفظه

این نمودار را می‌توان در دو بخش در نظر گرفت، بخش اول مربوط به نقاطی است که دمای خروجی نسبتاً ثابت است، در این شرایط بیشتر بودن بازده احتراق در نسبت‌های آمونیاک کمتر، مربوط به دبی هوای بیشتر است. همانطور که در بخش قبل آمد، برای ثابت نگه داشتن نسبت هم‌ارزی، باید مقدار هوا با افزایش نسبت آمونیاک در سوخت، کاهش یابد. بنابراین، در این شرایط علی‌رغم ثابت ماندن دمای خروجی، با کم شدن دبی هوا، بازده احتراق کمتر می‌شود و یعنی در توان حرارتی و نسبت هم‌ارزی ثابت، انرژی کمتری از احتراق آمونیاک حاصل شده و توانایی محفظه در استحصال انرژی از مخلوط سوخت افت داشته است.

در نسبت آمونیاک ۵۰٪ در توان حرارتی ۹/۷ کیلووات، دلیل واضح افت بازده احتراق به دلیل افت شدید دمای خروجی است، که این خود به علت عدم شکل‌گیری احتراق مناسب و عدم توانایی استخراج انرژی با راندمان مطلوب از مخلوط سوخت است که نقطه عملکردی مناسبی برای محفظه با سوخت با نسبت اختلاط ۵۰٪ آمونیاک بنظر نمی‌رسد و محفظه در حال نزدیک شدن به شرایط ناپایداری و خاموشی خود است و باید از آن فاصله گرفت. شکل ۱۰، متغیر یکپارچگی توزیع دمای خروجی محفظه را برای نقاط مختلف تست تجربی جدول ۱ نشان می‌دهد. متغیر یکپارچگی توزیع دمای خروجی نیز براساس رابطه‌ی ۲ محاسبه شده است [۳۱]،

$$PF = \frac{T_{\text{maximum}} - T_{\text{average}}}{T_{\text{average}} - T_{\text{inlet}}} \quad (2)$$

که در آن،  $T_{\text{maximum}}$  و  $T_{\text{average}}$  به ترتیب بیشینه و متوسط دمای خروجی محفظه بوده و  $T_{\text{inlet}}$  دمای ورودی محفظه است. متغیر یکپارچگی توزیع دمای خروجی هرچه مقدار کمتری داشته باشد، به معنای توزیع دمای یکنواخت‌تر در خروجی محفظه است. در واقع این پارامتر تغییر دما در خروجی را نسبت به افزایش دما در سرتاسر محفظه احتراق نشان می‌دهد و هر چه مقدار این پارامتر به صفر نزدیک شود، عملکرد بهتری از محفظه به دست می‌آید. استفاده از آمونیاک باعث بدتر شدن اوضاع در تمام نسبت‌ها در مقایسه با سوخت گاز طبیعی شده است، البته با کشیده شدن شعله به انتهای محفظه در اثر افزودن آمونیاک به سوخت، افزایش متغیر یکپارچگی انتظار می‌رفت. این تغییر دمای بیشتر، به شدت در عمر پره‌های توربین که تابعیتی زیادی از نوسانات دما دارند، تأثیرگذار هستند. بدترین شرایط مربوط به نسبت آمونیاک ۳۰٪ است که نسبت به شرایط گاز طبیعی، متغیر یکپارچگی به ترتیب ۲۵٪ و ۱۵٪ برای توان‌های حرارتی ۱۲/۱ کیلووات و ۹/۷ کیلووات افزایش داشته است. همچنین، با کمتر شدن توان حرارتی محفظه، متغیر یکپارچگی زیاد می‌شود. این افزایش در صورت استفاده از تنها گاز طبیعی شدیدتر بوده (۱۰٪) و در شرایط استفاده از مخلوط سوخت آمونیاک/متان به طور متوسط در حدود ۵٪ است.

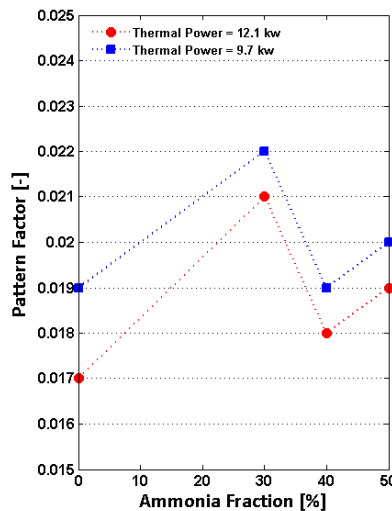


Figure 10- Combustor outlet pattern factor  
 شکل ۱۰- متغیر یکپارچگی توزیع دمای خروجی

همانطور که در نتایج حاصل در این بخش مشاهده شد، افزودن آمونیاک به گاز طبیعی، برای محفظه‌ی موجود چالش برانگیز بوده و تمام پارامترها را دستخوش تغییر قرار داده است. افزودن آمونیاک به گاز طبیعی، سبب شده است تا مقدار NO<sub>x</sub> تولیدی محفظه بشدت افزایش یابد و همچنین مقدار CO تولیدی در سطح بالایی نگه داشته شود. البته در نسبت آمونیاک ۵۰٪ در مخلوط سوخت، اگرچه مقدار NO<sub>x</sub> و CO افت می‌کنند ولی با توجه به افت پارامترهای عملکردی محفظه از جمله، بازده احتراق، این شرایط نیز نقطه‌ی عملکردی مناسبی برای محفظه به‌نظر نمی‌رسد. بنابراین بنظر می‌رسد، طراحی‌های رایج موجود برای محفظه احتراق برای استفاده از مخلوط سوخت آمونیاک/ متان گزینه مناسبی نبوده و اصلاحات جدی را نیاز دارد.

### جمع‌بندی

در این مطالعه، آزمایش‌های تجربی بر روی یک محفظه احتراق میکروتوربین گازی از نوع قوطی انجام شد که هدف آن بررسی اثر افزودن آمونیاک به گاز طبیعی و نسبت آن بر پارامترهای عملکردی، آلاینده‌ها و حرارتی محفظه است. در این مسیر، عملکرد محفظه در دو توان حرارتی مختلف مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج حاصل به شرح زیر است،

۱. توزیع دمای داخل محفظه، افت دما را با افزایش نسبت آمونیاک در مخلوط سوخت نشان می‌دهد که در بیشینه‌ی دما، این افت در حدود ۵٪ است. کاهش بیشینه‌ی دما به‌علت نرخ واکنش پایین‌تر آمونیاک نسبت به متان است که نرخ آزادسازی حرارت را در مقادیر آمونیاک بالاتر کاهش می‌دهد.

۲. شعله‌ی تشکیل شده داخل محفظه به دلیل ورود جریان هوای پیچشی، در نزدیکی لاینر قرار دارد. افزودن آمونیاک به گاز طبیعی، بدلیل کاهش نرخ واکنش، سبب می‌شود تا ناحیه‌ی دما بالا محدودتر و کوچک‌تر شده و به طور خاص، ناحیه‌ی دما بالای ناحیه‌ی اول محفظه افت دمای شدیدی کرده و احتراق مخلوط سوخت بیشتر در انتهای محفظه رخ می‌دهد، که این تأخیر سبب برخورد جبهه شعله با هوای سرد رقیق‌سازی و افت عملکرد احتراقی محفظه می‌شود.

۳. با افزودن آمونیاک به گاز طبیعی، مقدار NO<sub>x</sub> تولیدی محفظه بدلیل وجود نیتروژن در مخلوط سوخت، بشدت افزایش می‌یابد و در تمام نسبت‌های آمونیاک، بسیار بیشتر از شرایط سوخت ۱۰۰٪ گاز طبیعی است. مقدار NO<sub>x</sub> در نسبت آمونیاک ۴۰٪ بیشینه بوده و در نسبت‌های ۳۰٪ و ۵۰٪ مقداری کمتر است که رادیکال OH اثر تعیین‌کننده‌ی در مقدار NO<sub>x</sub> تولیدی



محفظه دارد. همچنین، با کاهش توان حرارتی بدلیل کاهش نرخ واکنش‌های شیمیایی ناشی از افت دما، مقدار NOx تولیدی کم می‌شود.

۴. مقدار CO تولیدی این محفظه در شرایط سوخت ۱۰۰٪ گاز طبیعی نیز بالا است. با افزودن آمونیاک به مخلوط سوخت، علی‌رغم کاهش نسبت متان مخلوط سوخت، مقدار CO تغییر چندانی نمی‌کند، اگرچه بیشینه آن در نسبت آمونیاک ۴۰٪ ضبط شده و مقدار آن در نسبت‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ اندکی کمتر است که مطابق روند NOx است. رقابت واکنش‌های شیمیایی کربنی و نیتروژنی در مقدار CO تولیدی محفظه عاملی اثرگذار است.

۵. متوسط دمای خروجی محفظه برای توان بالاتر، نسبتاً ثابت باقی مانده است که البته کاهش هوای محفظه، به منظور ثابت نگه داشتن نسبت هم‌ارزی، در این موضوع موثر بوده و عملاً شدت انرژی آزاد شده کمتر است. ولی برای توان حرارتی پایین‌تر و نسبت آمونیاک ۵۰٪، افت شدید دما ثبت شد که نشان می‌دهد محفظه به شرایط خاموشی نزدیک شده است و عملاً محدوده‌ی کاری محفظه کوچکتر شده است.

۶. افت عملکرد محفظه در صورت استفاده از آمونیاک، به خوبی در بازده احتراقی محفظه قابل مشاهده است که با افزایش نسبت آمونیاک، عملکرد محفظه در ایجاد احتراق مناسب و استحصال انرژی از مخلوط سوخت افت داشته است. با کاهش توان حرارتی محفظه، این امر تشدید شده است. در توان حرارتی ۱۲/۱ کیلووات و ۹/۷ کیلووات، بازده احتراقی محفظه از شرایط سوخت ۱۰۰٪ گاز طبیعی تا نسبت ۵۰٪ آمونیاک در مخلوط سوخت، به ترتیب ۶٪ و ۱۵٪ افت داشته است.

۷. با افزودن آمونیاک به متان در تمام نسبت‌ها، در مقایسه با شرایط مصرف ۱۰۰٪ سوخت گاز طبیعی، متغیر یکپارچگی توزیع دمای خروجی محفظه وضعیت بدتری دارد. در نتیجه می‌توان گفت، افزودن آمونیاک تأثیر زیادی بر پارامترهای عملکردی محفظه داشته و این اثر در توان‌های حرارتی مختلف رفتار مشابهی از خود نشان می‌دهد.

## منابع

- 1- Valera-Medina, A., Marsh, R., Runyon, J., Pugh, D., Beasley, P., Hughes, T. and Bowen, P., "Ammonia-methane combustion in tangential swirl burners for gas turbine power generation," *Applied Energy*, vol. 185, pp. 1362-1371, 2017.
- 2- Dimitriou, P. and Javaid, R., "A review of ammonia as a compression ignition engine fuel," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 11, pp.7098-7118, 2020.
- 3- Valera-Medina, A., Amer-Hatem, F., Azad, A.K., Dedoussi, I.C., De Joannon, M., Fernandes, R.X., Glarborg, P., Hashemi, H., He, X., Mashruk, S. and McGowan, J., "Review on ammonia as a potential fuel: from synthesis to economics," *Energy & Fuels*, Vol. 35, No. 9, pp. 6964-7029, 2021.
- 4- Dai, L., Gersen, S., Glarborg, P., Levinsky, H. and Mokhov, A., "Experimental and numerical analysis of the autoignition behavior of NH3 and NH3/H2 mixtures at high pressure," *Combustion and flame*, vol. 215, pp.134-144, 2020.
- 5- Dai, L., Gersen, S., Glarborg, P., Mokhov, A. and Levinsky, H., "Autoignition studies of NH3/CH4 mixtures at high pressure," *Combustion and Flame*, Vol 218, pp.19-26, 2020.
- 6- Xiao, H., Lai, S., Valera-Medina, A., Li, J., Liu, J. and Fu, H., "Experimental and modeling study on ignition delay of ammonia/methane fuels," *International Journal of Energy Research*, Vol. 44, No. 8, pp.6939-6949, 2020.
- 7- Okafor, E.C., Naito, Y., Colson, S., Ichikawa, A., Kudo, T., Hayakawa, A. and Kobayashi, H., "Experimental and numerical study of the laminar burning velocity of CH4-NH3-air premixed flames," *Combustion and flame*, Vol. 187, pp.185-198, 2018.
- 8- Okafor, E.C., Naito, Y., Colson, S., Ichikawa, A., Kudo, T., Hayakawa, A. and Kobayashi, H., "Measurement and modelling of the laminar burning velocity of methane-ammonia-air flames at high pressures using a reduced reaction mechanism," *Combustion and Flame*, Vol. 204, pp.162-175, 2019.
- 9- Shrestha, K.P., Lhuillier, C., Barbosa, A.A., Brequigny, P., Contino, F., Mounaïm-Rousselle, C., Seidel, L. and Mauss, F., "An experimental and modeling study of ammonia with enriched oxygen content and ammonia/hydrogen laminar flame speed at elevated pressure and temperature," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 38, No. 2, pp.2163-2174, 2021.
- 10- Chai, W.S., Bao, Y., Jin, P., Tang, G. and Zhou, L., "A review on ammonia, ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 147, p.111254, 2021.
- 11- Zitouni, S.E., Mashruk, S., Mukundakumar, N., Brequigny, P., Zayoud, A., Pucci, E., Macchiavello, S., Contino, F., Mounaïm-Rousselle, C., Bastiaans, R. and Valera-Medina, A., "AMMONIA BLENDED fuels-energy solutions for a green future," in *10th International Gas Turbine Conference, October, 2021*.

- 12- Shu, T., Xue, Y., Zhou, Z. and Ren, Z., "An experimental study of laminar ammonia/methane/air premixed flames using expanding spherical flames," *Fuel*, vol. 290, p.120003, 2021.
- 13- Xiao, H., Valera-Medina, A. and Bowen, P.J., "Study on premixed combustion characteristics of co-firing ammonia/methane fuels," *Energy*, Vol. 140, pp.125-135, 2017.
- 14- Xiao, H., Lai, S., Valera-Medina, A., Li, J., Liu, J. and Fu, H., "Study on counterflow premixed flames using high concentration ammonia mixed with methane," *Fuel*, Vol. 275, p.117902, 2020.
- 15- Lee, J.H., Lee, S.I. and Kwon, O.C., "Effects of ammonia substitution on hydrogen/air flame propagation and emissions," *International journal of hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 20, pp.11332-11341, 2010.
- 16- Zhang, M., An, Z., Wei, X., Wang, J., Huang, Z. and Tan, H., "Emission analysis of the CH<sub>4</sub>/NH<sub>3</sub>/air co-firing fuels in a model combustor," *Fuel*, Vol. 291, p.120135, 2021.
- 17- Zhang, M., An, Z., Wang, L., Wei, X., Jianayihan, B., Wang, J., Huang, Z. and Tan, H., "The regulation effect of methane and hydrogen on the emission characteristics of ammonia/air combustion in a model combustor," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, No. 40, pp.21013-21025, 2021.
- 18- An, Z., Zhang, M., Zhang, W., Mao, R., Wei, X., Wang, J., Huang, Z. and Tan, H., "Emission prediction and analysis on CH<sub>4</sub>/NH<sub>3</sub>/air swirl flames with LES-FGM method," *Fuel*, Vol. 304, p.121370, 2021.
- 19- Xiao, H., Valera-Medina, A., Marsh, R. and Bowen, P.J., "Numerical study assessing various ammonia/methane reaction models for use under gas turbine conditions," *Fuel*, Vol. 196, pp.344-351, 2017.
- 20- Xiao, H., Howard, M., Valera-Medina, A., Dooley, S. and Bowen, P.J., "Study on reduced chemical mechanisms of ammonia/methane combustion under gas turbine conditions," *Energy & Fuels*, Vol. 30, No. 10, pp.8701-8710, 2016.
- 21- Valera-Medina, A., Morris, S., Runyon, J., Pugh, D.G., Marsh, R., Beasley, P. and Hughes, T., "Ammonia, methane and hydrogen for gas turbines," *Energy Procedia*, Vol. 75, pp.118-123, 2015.
- 22- Miller, J.A. and Bowman, C.T., "Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion," *Progress in energy and combustion science*, Vol. 15, No. 4, pp.287-338, 1989.
- 23- Zhou, L.X., Chen, X.L. and Zhang, J., "Studies on the effect of swirl on NO formation in methane/air turbulent combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, No. 2, pp.2235-2242, 2002.
- 24- Buekens, A., "Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation," *International Journal of Environment & Pollution*, Vol. 17, No. 3, pp.291-291, 2002.
- 25- Ariemma, G.B., Sorrentino, G., Ragucci, R., de Joannon, M. and Sabia, P., "Ammonia/Methane combustion: stability and NO<sub>x</sub> emissions," *Combustion and Flame*, Vol. 241, p.112071, 2022.
- 26- Ariemma, G.B., Bozza, P., de Joannon, M., Sabia, P., Sorrentino, G. and Ragucci, R., "Alcohols as energy carriers in MILD combustion," *Energy & Fuels*, Vol. 35, No. 9, pp.7253-7264, 2021.
- 27- Sabia, P., Sorrentino, G., Bozza, P., Ceriello, G., Ragucci, R. and De Joannon, M., "Fuel and thermal load flexibility of a MILD burner," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 37, No. 4, pp.4547-4554, 2019.
- 28- Sabia, P., Manna, M.V., Ragucci, R. and de Joannon, M., "Mutual inhibition effect of hydrogen and ammonia in oxidation processes and the role of ammonia as "strong" collider in third-molecular reactions," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 56, pp.32113-32127, 2020.
- 29- Glarborg, P., Miller, J.A., Ruscic, B. and Klippenstein, S.J., "Modeling nitrogen chemistry in combustion," *Progress in energy and combustion science*, Vol. 67, pp.31-68, 2018.
- 30- Lefebvre, A.H. and McDonell, V.G., *Atomization and sprays*. CRC press, 2017.
- 31- Lefebvre, A.H. and Ballal, D.R., *Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions*. CRC press, 2010.

## English Abstract

### Experimental study of Ammonia-Methane mixture combustion in the micro gas turbine combustor

Milad Bastani<sup>1</sup>, Sadegh Tabejamaat<sup>2</sup>, Hossein Ashini<sup>3\*</sup>

1- Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran, Milad.bastani@aut.ac.ir

2- Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran, Sadegh@aut.ac.ir

3- Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran, H\_ashini@aut.ac.ir

\*Corresponding author

(Received: 2023/03/01, Received in revised form: 2023/04/09, Accepted: 2023/04/25)

To achieve the zero carbon emissions goal, it is of great importance to replace conventional hydrocarbon fuels with carbon-free fuels. In terms of carbon-free fuel, ammonia has several advantages over hydrogen, despite of problems such as low flame speed and high NO<sub>x</sub> emission. The present experimental study investigates the effect of adding ammonia to methane and its ratio on the combustion performance of a can-type micro-turbine combustion chamber under atmospheric condition at two different heat powers. The results show that with an increase in the percentage of ammonia in the fuel mixture, maximum flame temperature has decreased and combustion has delayed until the end of chamber. Also, the addition of ammonia, despite not reducing CO, results in a sharp increase in the NO<sub>x</sub> production. In addition, although the outlet temperature of the chamber has not changed much except for one condition, combustion efficiency of the chamber has decreased with the increase of ammonia ratio, and pattern factor is more than the case of pure natural gas. Therefore, although the use of methane/ammonia fuel mixture with stable combustion conditions in the existing chamber is possible, it requires modifications to achieve optimal combustion performance.

**Keywords:** Micro-turbine combustion chamber, Ammonia, Methane, Mixing percentage, Performance parameter