

بررسی اثر فشار بر عملکرد محفظه احتراق موتورهای توربینی

شهاب الدین گرشاسبی ^{*} کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران، amt582000@yahoo.com
 امیرمهدی تحسینی ^{*} استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، am_tahsini@iust.ac.ir

چکیده

با توجه به پیچیدگی فرایندهای حاکم بر جریان در توربین گاز، انجام آزمون‌های تجربی برای اطمینان از عملکرد آن الزامی است اما ایجاد شرایط حاکم بر اجزا در شرایط عملکردی بسیار پیچیده است. اکثر آزمون‌های محفظه احتراق در شرایط جوی انجام و سپس نتایج به شرایط عملکردی تعمیم داده می‌شوند. این کار در کنار کمبود تست‌ایستندهای دارای شرایط عملکردی واقعی، بر این اساس توسعه یافته است که اغلب فرایندهای حاکم بر رفتار محفظه با تغییر فشار عملکردی دستخوش تغییر قابل توجهی نبوده و به‌ویژه اگر شکل شعله تغییر نکند، می‌توان در فشار پایین نیز رفتار محفظه را مطالعه نمود. در تحقیق حاضر این موضوع به صورت عددی برای یک محفظه احتراق واقعی مورد بررسی قرار گرفته و مشاهده شده است که مشخصه‌های شعله تغییر چندانی با افزایش فشار ندارند. همچنین آلاینده NO_x در فشارهای بالاتر افزایش می‌یابد. ساختارهای کلی جریان تحت تاثیر افزایش فشار قرار نگرفت اما میزان افت فشار افزایش یافت. نتایج حاضر نشان می‌دهد در محفظه احتراق مورد نظر، آزمون جوی می‌تواند نتایج قابل قبول و تعمیم به شرایط پرفشار ارائه کند.

واژه‌های کلیدی: توربین گاز، محفظه احتراق، اثر فشار، آزمون جوی، دینامیک سیالات محاسباتی، موتور توربینی.

Pressure Effects on Combustion Chamber Performance of the Turbine Engines

Sh. Garshasbi School of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology, Narmak, Tehran, Iran.
 A. M. Tahsini School of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology, Narmak, Tehran, Iran.

Abstract

Due to the complexity of the processes governing the flow in the gas turbine, it is necessary to perform experimental tests to ensure the performance, but creating the conditions governing the components in the operational conditions is very complex. Most of the combustion chamber tests are performed in atmospheric conditions and then the results are generalized to the operational conditions. This work, along with the lack of test stands with real operational conditions, has been developed based on the fact that most of the processes governing the behavior of the chamber have not undergone significant changes with the change of operating pressure, and especially if the shape of the flame does not change, it is possible to study the behavior of the chamber even at low pressure. In the present research, this issue has been numerically investigated for a real combustion chamber and it has been observed that changes are characterized by increasing pressure. Also, NO_x pollutant increases at higher pressures. The overall flow structures were not affected by the pressure increase, but the pressure loss rate increased. The current results show that in the desired combustion chamber, the atmospheric test can provide acceptable results and can be generalized to high pressure conditions.

Keywords: Gas turbine, Combustion chamber, Pressure effect, Atmospheric test.

خروجی است. در توربین گاز هوایی، خروجی یک نازل است که باعث افزایش سرعت جریان به منظور تولید نیروی پیشران می‌شود [۲، ۳].

احتراق شامل مجموعه‌ای از واکنش‌های شیمیایی است که در طی آن سوخت، اکسید شده و مقدار زیادی انرژی آزاد می‌شود [۴]. احتراق در چرخه توربین گاز یک فرآیند پیوسته است که در آن سوخت با هوای آماده شده توسط کمپرسور، سوزانده می‌شود. جرقه‌زنی فقط برای شروع فرآیند احتراق مورد نیاز است و پس از آن شعله باید خودبه‌خود حفظ شود [۵]. یک محفظه احتراق توربین گاز باید طیف وسیعی از الزامات را برآورده کند که اهمیت آن‌ها در انواع موتور متفاوت است. مهم‌ترین این الزامات عبارت‌اند از: بازده احتراق بالا، پایداری، افت فشار کم، توزیع دمای مناسب، آلاینده‌گی پایین، وزن مناسب و دوام. همچنین برای همه انواع توربین گاز، مصرف سوخت کم و انتشار آلاینده پایین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۶].

برای آزمایش توربین گاز دو رویکرد وجود دارد، اول اینکه توربین گاز را با همه اجزایش مورد آزمایش قرار داد؛ دوم اینکه اجزای توربین گاز را جداگانه آزمایش نمود. روش اول نسبت به روش دوم، پرهزینه‌تر و پیچیده‌تر در هماهنگی اجزا و اندازه‌گیری مشخصه‌ها است. از این رو

۱- مقدمه

اصطلاح "توربین گاز"^۱ به عنوان یک واژه عمومی برای انواع موتورهای توربینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. توربین گازه‌ای زمینی برای تولید برق و نیز افزایش فشار خطوط انتقال گاز مورد استفاده قرار گرفته و توربین گازه‌ای هوایی در انواع موتورهای توربینی مانند موتورهای توربوپوفن و توربوجت استفاده می‌شوند. به صورت کلی در توربین‌های گاز، انرژی از سوزاندن مخلوط قابل احتراق سوخت و هوا تولید می‌شود. در دهه‌های اخیر رشد زیادی در فناوری توربین گاز رخ داده و افزایش نسبت فشار و دمای محصولات احتراق برای دستیابی به بازده حرارتی بیشتر، همواره مورد نظر بوده است [۱، ۲]. توربین گاز بر اساس چرخه ترمودینامیکی برایتون^۲ کار می‌کند که از دو فرآیند فشار ثابت و دو فرآیند انتروپی ثابت تشکیل شده است. هر توربین گاز دارای ۵ بخش اصلی شامل ورودی، کمپرسور، محفظه احتراق، توربین و

¹ Gas Turbine

² Brayton Cycle

روش دوم در دنیا مرسوم‌تر است؛ یعنی اجزای اصلی توربین گاز شامل کمپرسور، محفظه احتراق و توربین به صورت جداگانه مدل‌سازی و آزمایش می‌شوند.

برای رسیدن به طراحی بهینه، بازه احتراق بالا و اطمینان از عملکرد مناسب، آزمایش محفظه احتراق قبل از به کارگیری در توربین گاز، ضروری است. پس با ساخت فضایی مناسب برای عملیات آزمایش یک محفظه، آن را در شرایط متفاوت عملکردی، جدا از توربین گاز، تحت بررسی قرار می‌دهند. نکته‌ای که وجود دارد انجام بیشتر این آزمون‌ها در شرایط جوی یا کم‌فشار است؛ چراکه ایجاد شرایط عملکردی از جمله فشار و دمای بالا، نیازمند هزینه زیاد و تجهیزاتی پیشرفته است و همچنین اندازه‌گیری مشخصه‌های مهم مانند فشار، دما، گونه‌ها و... به چالش برمی‌خورند. بنابراین اکثر این آزمون‌ها در شرایط فشار پایین انجام می‌شوند و با تحلیل‌های عددی و قوانین مقیاس کردن^۱، رفتار محفظه احتراق در شرایط عملکردی پیش‌بینی می‌شود [۷].

در گذشته مدل‌سازی‌های مربوط به توربین گاز بیشتر به پایه مدل‌های تجربی بود. اما به دلیل هزینه بالا و دشوار بودن آن، با توسعه ابزارهای حل عددی، استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی رواج قابل توجهی یافته است. به این ترتیب انجام سعی و خطا در ساخت توربین های گاز کاهش یافته است و تا ساخت توربین گاز نهایی، نمونه‌های آزمایشی کمتری ساخته می‌شود. از گذشته مطالعه تاثیر فشار بر عملکرد توربین گاز مطرح بوده ولی به صورت خاص درباره محفظه احتراق و مشخصه‌های آن کمتر بحث شده است. در ادامه به بررسی اثر فشار بر روی عملکرد محفظه احتراق پرداخته می‌شود تا مشخص شود آیا انجام آزمون‌های جوی، می‌تواند نتایج خوبی را ارائه دهد که آن را به فشارهای بالاتر تعمیم داد یا خیر. این بررسی بر روی یک محفظه احتراق صنعتی که اطلاعات کافی از آن در دسترس بود، انجام شده است.

مطالعه اثر فشار بر روی آلاینده‌گی سال‌ها مورد توجه پژوهشگران بوده است. در سال ۲۰۰۰ بارگاو و همکاران [۸] انتشار آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن (ناکس^۲) و کربن مونوکسید^۳ توربین گاز صنعتی را تحت تاثیر فشار بررسی کردند و مشاهده نمودند در حالیکه انتشار ناکس با افزایش فشار افزایش می‌یابد، انتشار کربن مونوکسید کاهش می‌یابد. سال ۲۰۰۱ توسط مارتلی و همکاران [۷] مطالعه تجربی و عددی خوبی درباره مقیاس کردن آلاینده‌های محفظه احتراق توربین گاز از حالت جوی به عملکرد فشار بالا انجام شد. آن‌ها رابطه‌ای نمایی میان آلاینده ناکس و نسبت فشار ارائه کردند. در سال ۲۰۱۷ توسط بولیسوا و همکاران [۹] مطالعه جامعی روی اثر فشار بر انتشار آلاینده‌ها و پایداری احتراق نوعی محفظه انجام شد. آن‌ها با محاسبات خود، حد انتشار و پایداری را به دست آوردند و نشان دادند که افزایش فشار در محفظه احتراق منجر به تغییر مرز احتراق پایدار به سمت ناحیه‌ای با ضرایب هوای اضافی کمتر می‌شود. در سال ۲۰۲۱ گوین و همکاران [۱۰] با شبیه‌سازی عددی اثر فشار را روی آلاینده‌های ناکس و کربن

مونوکسید در محفظه احتراق با سوخت پیش‌آمیخته رقیق، انجام دادند و به نتایج خوبی در نسبت‌های هم‌ارزی^۴ متفاوت رسیدند.

اما در مورد دیگر مشخصه‌ها از جمله شعله، در سال ۱۹۹۸ حسن و همکاران [۱۱] آزمایش‌هایی را به منظور بررسی تأثیر فشار بر سرعت شعله آرام شعله‌های متان-هوای پیش‌آمیخته انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند که در فشارهای بالا، شعله به دلیل اثرات انتشار، ناپایدار می‌شود. در سال ۲۰۰۳ گریبل و همکاران [۱۲] خصوصیات میدان جریان شعله‌های آشفته پیش‌آمیخته را تحت شرایط تحت فشار به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش فشار و شدت آشفتگی^۵ بر موقعیت نوک شعله اندکی تأثیر می‌گذارد، اما سطح موجدار جلوی شعله را افزایش می‌دهد. هم چنین سوپاکا و همکاران [۱۳] در کار خود مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را برای شعله‌های متان-هوا تثبیت شده در شرایط مخلوط استوکیومتری^۶ و رقیق انجام داده‌اند. در نهایت نتیجه‌گیری شد که انحنای جلوی شعله به شدت تحت تأثیر تغییر فشار قرار می‌گیرند و چروکیده می‌شوند. سال ۲۰۰۶ کای و همکاران [۱۴] اثرات فشار را بر عملکرد یک محفظه احتراق توربین گاز برای سوزاندن گاز سنتز با شبیه‌سازی عددی مورد بررسی جامع قرار دادند؛ نتایج عددی نشان داد که در دمای ورودی سوخت و هوا و نسبت هم‌ارزی یکسان، فشار عملیاتی تأثیر کمتری بر میدان‌های جریان دارد، اما تأثیر آن بر توزیع دما آشکار است. در سال ۲۰۱۲ ابراهیم و رحمان [۱۵] با شبیه‌سازی عددی ساده بر اساس روابط ترمودینامیکی، تاثیر نسبت تراکم را بر مشخصه‌های توربین گاز چرخه ترکیبی بررسی کردند؛ آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش نسبت فشار در دمای ورودی ثابت توربین، بازه حرارتی کلی افزایش می‌یابد. گوسوامی و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۴ به صورت عددی بر روی شعله‌های مسطح متقارن محوری در شرایط فشار بالا مطالعه کردند. آن‌ها شعله‌های پیش‌آمیخته آرام متان را در فشارهای بالای ۱.۵ مگاپاسکال با استفاده از مکانیزم‌های واکنش شیمیایی یک مرحله‌ای و دقیق بررسی کردند. افزایش غیرخطی انحنای شعله در شرایط فشار بالا مشاهده شد. در سال ۲۰۱۵ راتزکه و همکاران [۱۷] اثر فشار را برای موتورهای احتراق داخلی به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند، افزایش فشار منجر به تغییر جزئی موقعیت متوسط جلوی شعله در بالادست به سمت ورودی محفظه احتراق می‌شود که می‌تواند به عنوان یک افزایش کوچک در سرعت شعله آشفته تفسیر شود. در سال ۲۰۱۸ توسط وانگ و همکاران [۱۸] شبیه‌سازی سه‌بعدی شکل شعله پیش‌آمیخته، آشفته و رقیق هیدروژن-هوا در بازه ای از فشارها مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که با افزایش فشار ساختار جلوی شعله باریکتر و تیزتر می‌شود. سال ۲۰۱۹ صخریه [۱۹] تاثیر فشار را بر روی دمای آدیاباتیک^۷ شعله و سرعت آرام شعله بررسی کرد و همچنین رابطه‌ای برای آن‌ها ارائه داد. در سال ۲۰۲۰ می و همکاران [۲۰] انتشار شعله آرام آمونیاک و گاز سنتز را، به عنوان سوختی جایگزین، تا فشار ۱۰ اتمسفر بررسی کردند.

⁴ Equivalence Ratio

⁵ Turbulence

⁶ Stoichiometric

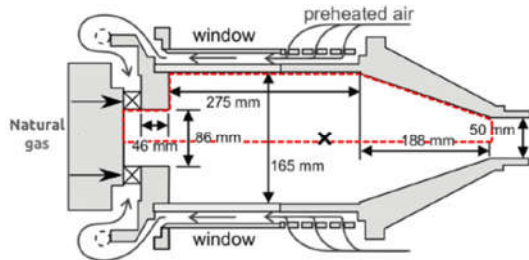
⁷ Adiabatic

¹ Scaling

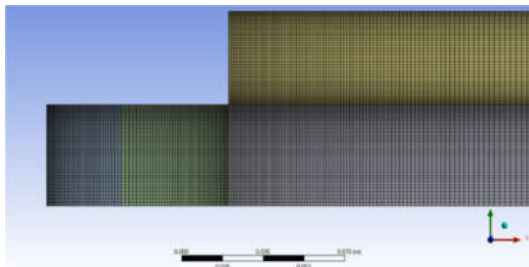
² NOx

³ CO

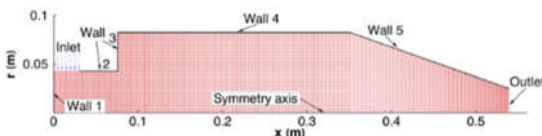
شبهه در نزدیک دیواره‌ها کوچکتر انتخاب شده تا سرعت همگرایی در تعداد شبهه پایین‌تر، بیشتر شود. نوع هر المان نیز چهارضلعی انتخاب شده است. طی بررسی‌های انجام شده، این شبهه کیفیت بالایی ارائه کرد. با توجه به استفاده از تابع دیواره در مدل آشفته‌گی، مقدار مناسب y^+ در حدود ۳۰ بوده که در مطالعات انجام شده مد نظر بوده است.



شکل ۲ - ابعاد محفظه احتراق و نیمه انتخاب شده برای طراحی متقارن محوری دوبعدی (خط چین قرمز) [۲۲]



شکل ۳ - ساختار شبهه سازمان‌دهی شده با المان‌های کوچکتر در دیواره‌ها



شکل ۴. مرزهای محفظه احتراق [۲۲]

مطابق با شکل ۴ شرایط مرزی تعریف شد. ۵ دیواره با دمای ثابت ۶۷۳ کلون وجود دارد. فشار کل محفظه در شرایط عملکردی ۱۵ بار است. ورودی محفظه احتراق شامل مخلوط متان و هوای پیش آمیخته می‌باشد و با ۳ مولفه سرعت محوری، شعاعی و مماسی وارد محفظه می‌شود. دبی جرمی سوخت (متان) و هوا به ترتیب ۰/۰۰۴۹ و ۱/۳۸۷۵ کیلوگرم بر ثانیه با دمای ۶۷۳ کلون است. همچنین کسر جرمی گونه‌ها در ورودی محفظه مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است. با ورود این گونه‌ها به محفظه و ایجاد شرایط فعالسازی واکنش‌ها (به‌وسیله دمای بالای مناسب)، احتراق شبیه‌سازی می‌شود.

جدول ۱- کسر جرمی گونه‌ها در ورودی محفظه احتراق

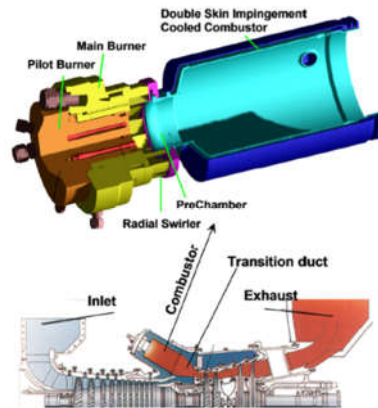
گونه	نماد شیمیایی گونه	کسر جرمی در ورودی
نیتروژن	N ₂	۰/۷۲۹۴
اکسیژن	O ₂	۰/۲۲۳۵
متان	CH ₄	۰/۰۳۴۱
آرگون	Ar	۰/۰۱۲۵

چنانکه پیشتر ذکر شد، استفاده از آزمون‌های جوی در شناسایی رفتار محفظه احتراق در صنایع توربین گاز، امری رایج بوده و سرتاسر دنیا از این ابزار جهت مطالعه محفظه احتراق استفاده می‌شود. حال آنکه این بررسی‌ها نسبت به شرایط عملکردی دارای خلاءهایی می‌باشد؛ با وجود بررسی‌های متعددی که بر روی اثر فشار بر رفتار محفظه انجام شده است، بررسی متمرکزی در یک محفظه احتراق واقعی بر روی اثر فشار عملکردی بر شکل شعله انجام نشده است و با توجه به اینکه اساس درستی آزمون جوی، عدم تغییر قابل توجه شکل شعله با کاهش فشار است؛ پس تاثیر این موضوع بر عملکرد توربین گاز اهمیت بالایی پیدا می‌کند. بنابراین در تحقیق حاضر، یک محفظه احتراق صنعتی بدین منظور مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن ارائه شده است.

۲- مبانی شبیه‌سازی

۲-۱- هندسه و جزئیات شبیه‌سازی

شبیه‌سازی این موضوع در مجموعه نرم‌افزارهای "ANSYS-2021" انجام شد. محفظه احتراق شبیه‌سازی شده از نوع زیمنس SGT-100 یک توربین گاز صنعتی است که دارای توان خروجی ۴/۳۵ تا ۵/۷ مگاوات می‌باشد. SGT-100 با سیستم احتراق DLE^۱ در دسترس است که سطوح بسیار پایین آلاینده ناکس تولید می‌کنند. در شکل ۱ محفظه احتراق مورد نظر و اجزای آن مشخص شده است. این شبیه‌سازی به صورت پایا^۲ انجام شد و همچنین هندسه‌ای به شکل متقارن محوری دوبعدی^۴ در نظر گرفته شد تا پیچیدگی کمتر شود و سرعت حل بالاتر برود.



شکل ۱ - محفظه احتراق توربین گاز صنعتی SGT-100 با نمای مقطعی توربین گاز [۲۲]

هندسه مورد نظر با ابعاد ذکر شده (شکل ۲) برای تولید شبهه مناسب، در محیط "مدل ساز طراحی" ANSYS^۵ به ۵ بخش تقسیم شد. با توجه به اثرات لایه مرزی، همانگونه که در شکل ۳ نمایان است،

¹. Ansys 2021-R1

². Dry Low Emission

³. Steady

⁴. 2D-Axisymmetric

⁵. Design Modeler

کربن دی‌اکسید	CO ₂	۰/۰۰۰۵
---------------	-----------------	--------

۲-۲- معادلات

معادلات حاکم بر شبیه‌سازی احتراق، ۱-معادله پیوستگی ۲- معادله مومنتوم ۳-معادله انرژی ۴-معادلات گونه‌ها ۵-معادلات آشفته‌گی $k-\epsilon$ می‌باشند. تمامی این معادلات به صورت همزمان حل خواهند شد تا پس از همگرایی، نتیجه مناسب به دست آید. همچنین در این شبیه‌سازی حل‌گر مدل "جفت شده بر پایه فشار"^۲ انتخاب شده است. حل‌کننده‌های مبتنی بر فشار، مومنتوم و فشار را به عنوان متغیرهای اولیه در نظر می‌گیرند. مدل جفت شده فشار-سرعت به الگوریتم عددی اشاره دارد که از ترکیبی از معادلات پیوستگی و مومنتوم برای استخراج معادله فشار (یا تصحیح آن) هنگام استفاده از حل‌گر مبتنی بر فشار استفاده می‌کند.

معادله پیوستگی

اولین اصل اساسی دینامیک سیالات محاسباتی، بقای جرم است. به طور دقیق‌تر، جرم خالصی که از مرز سیستم عبور می‌کند باید با تجمع یا کاهش جرم در سیستم متعادل شود. به عبارت دیگر توضیح می‌دهد که جرم را نمی‌توان از بین برد یا ایجاد کرد، یعنی آنچه وارد محفظه می‌شود باید در آخر از آن خارج شود. (معادله ۱).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

که در آن، ρ چگالی و u, v سرعت جریان در جهات افقی و عمودی هستند [۲۵].

معادله مومنتوم (تکانه)

تکانه یک کمیت برداری است که حاصل ضرب جرم در بردار سرعت است. در یک سیستم بسته، تکانه نمی‌تواند ایجاد شود یا از بین برود و باید حفظ شود (معادله ۲).

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot \vec{V}) + \vec{F}_b \quad (2)$$

این در واقع بیان مجدد قانون دوم حرکت نیوتن است که در آن، ρ چگالی گاز، \vec{V} بردار سرعت، ∇p گرادین فشار، μ لزجت دینامیکی و \vec{F}_b نیروی حجمی می‌باشد [۲۵].

معادله انرژی

معادله انرژی بیان می‌کند که در یک سیستم بسته، انرژی نمی‌تواند ایجاد شود یا از بین برود (معادله ۳). این معادله در طول شبیه‌سازی برای محاسبه میدان دما حل می‌شود [۲].

$$\frac{\partial(\rho e_t)}{\partial t} + \nabla \cdot [\vec{V}(\rho e_t + p)] = \nabla \cdot [K \nabla T + (\vec{\tau} \cdot \vec{V})] + \dot{S}_g \quad (3)$$

این در واقع بیان مجدد قانون اول ترمودینامیک است که در آن، ρ چگالی گاز، e_t انرژی کل بر واحد جرم سیستم، \vec{V} بردار سرعت، p فشار، K رسانایی گرمایی، ∇T گرادین دما، $\vec{\tau}$ تانسور تنش برشی و \dot{S}_g منبع تولید انرژی هستند [۲۵].

معادله گونه‌ها

معادله گونه‌ها مانند معادلات قبلی بیان می‌کند که گونه‌های مختلف شیمیایی در یک سیستم بسته قابل ایجاد یا از بین رفتن نیستند (معادله ۴). در این شبیه‌سازی معادله گونه‌ها تلفیق شده با مکانیزم Chemkin می‌باشد. واکنش‌دهنده‌ها و فرآورده‌های هر ۳۲۵ واکنش

مدل سازی احتراق یکی از چالش برانگیزترین مسائل در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است. به طور کلی، سینماتیک کامل احتراق هنوز ناشناخته است. دلیل این واقعیت رفتار احتراق است. با توجه به اینکه یک سوخت معمولی به دلیل نسبت سوخت به هوا، فشار، دما و بسیاری از عوامل دیگر محصولات متنوعی را ارائه می‌دهد؛ این امر منجر به مکانیزم پیچیده احتراق می‌شود [۱]. فرآیند احتراق نتیجه یک واکنش شیمیایی گرم‌مازای قوی در نتیجه تبادل انرژی است که در اثر برخوردهای بین مولکولی رخ می‌دهد. به طور کلی، در دمای محیط، یک واکنش شیمیایی بسیار آهسته رخ می‌دهد؛ زیرا اگرچه برخورد در سطح مولکولی رخ می‌دهد، اما مقدار کافی انرژی برای ایجاد یک تبدیل شیمیایی تولید نمی‌کند. بر اساس تئوری جنبشی شیمیایی، تنها برخوردهای "فعال"، برخوردهایی که شامل مولکول‌هایی با انرژی اولیه بیشتر یا مساوی انرژی به نام انرژی فعال سازی هستند، منجر به واکنش شیمیایی می‌شوند [۳].

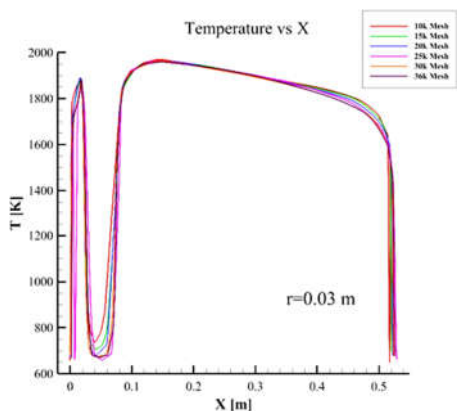
در این شبیه‌سازی از مدل شیمی نرخ محدود در انتقال گونه‌ها و مدل آشفته‌گی $k-\epsilon$ Realizable استفاده شد. مدل شیمی نرخ محدود امکان محاسبه نرخ واکنش توصیف شده توسط برهمکنش مولکولی بین اجزای سیال را فراهم می‌کند و به بهترین وجه برای موقعیت‌هایی اعمال می‌شود که مقیاس زمانی شیمیایی محدودکننده است. همچنین مدل آشفته‌گی $k-\epsilon$ Realizable مناسب برای جریان‌های چرخشی است و دارای همگرایی دقیق‌تر و سریع‌تر نسبت به سایر مدل‌های آشفته‌گی می‌باشد. این یک مدل دو معادله‌ای است به این معنی که دو معادله انتقالی اضافی برای نمایش خواص آشفته جریان در آن گنجانده شده است. معادله k به عنوان انرژی جنبشی آشفته‌گی و ϵ به عنوان نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفته‌گی می‌باشد [۲،۲۳].

مکانیزم احتراق در این شبیه‌سازی Chemkin^۱ GRI-Mech 3.0 [۲۴] در نظر گرفته شد. در این مدل که ۵۳ گونه را شامل می‌شود، ۳۲۵ واکنش شیمیایی به صورت زنجیره‌ای انجام می‌شوند تا پدیده احتراق به خوبی شبیه‌سازی شود. اینگونه نتایجی که بدست می‌آید بسیار نزدیک به واقعیت است. همانطور که در ادامه مشاهده خواهید کرد، این مکانیزم خود را در معادله گونه‌ها دخیل می‌کند.

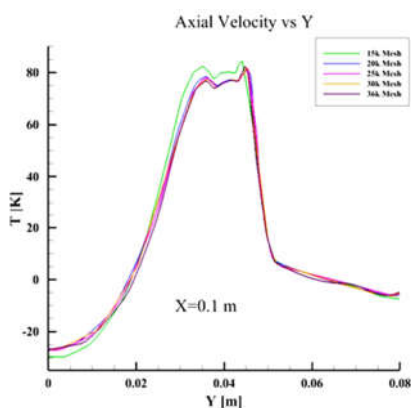
در این شبیه سازی تابش در نظر گرفته شده است. چراکه فشار علاوه بر فرایندهای واکنش‌های شیمیایی، بر انتقال حرارت از طریق تابش نیز اثر می‌گذارد. در محدوده معمول دمایی، گازهای دو اتمی با مولکول‌های متقارن (مانند O_۲، H_۲، و N_۲)، هیچ ظرفیتی برای گسیل و جذب تابش ندارند و می‌توان آن‌ها را شفاف نسبت به تابش فرض کرد. با این حال، گازهای سه اتمی و چند اتمی، مانند CO_۲، H_۲O، SO_۲، CH_۴، و CO و همچنین برخی از گازهای دو اتمی یونی توانایی قدرتمندی در انتشار و جذب تابش دارند. انتشار و جذب گازها با افزایش غلظت آن‌ها در افزایش می‌یابد. در داخل آستر، غلظت CO_۲ و H_۲O با افزایش فشار افزایش می‌یابد و ضریب جذب و انتشار گاز که تقریباً متناسب با فشار است، افزایش می‌یابد [۱۴].

² Pressure-Based Coupled Algorithm

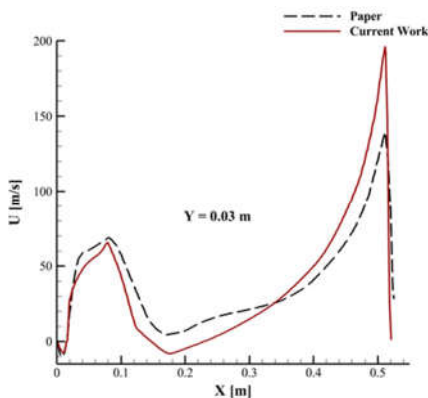
¹ Chemkin



شکل ۵ - نمودار استقلال حل از شبکه (دما برحسب طول در مولفه عرضی ثابت)



شکل ۶ - نمودار استقلال حل از شبکه (سرعت محوری برحسب عرض در مولفه طولی ثابت)



شکل ۷ - سرعت محوری به دست آمده در این کار و مقدار ارائه شده در مقاله مرجع [۲۲]

شیمیایی، باید پایستگی گونه‌ها را ارضا کنند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{V} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i \quad (4)$$

که در آن، ρ چگالی، Y_i کسر جرمی هر گونه، \bar{V} بردار سرعت، \bar{J}_i شار انتشار هر گونه، R_i نرخ خالص تولید هر گونه و S_i نرخ ایجاد گونه از هر منبع تعریف شده هستند [۲۵].

معادلات آشفته‌گی k-ε

آشفته‌گی به دلیل دشوار بودن پیش‌بینی آن، یکی از پیچیدگی‌های حل عددی می‌باشد. مدل k-ε یکی از رایج‌ترین مدل‌های آشفته‌گی است. این یک مدل دو معادله‌ای است، به این معنی که دو معادله انتقالی اضافی برای نمایش خواص آشفته جریان گنجانده شده است. این به مدل دو معادله‌ای اجازه می‌دهد تا اثراتی مانند همرفت و انتشار انرژی آشفته را در نظر بگیرد. این دو معادله با هم حل می‌شوند تا آشفته‌گی شبیه‌سازی شود [۲].

۳-۲- استقلال حل و اعتبارسنجی

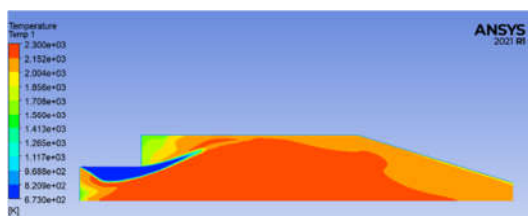
استقلال حل از شبکه با بررسی ۶ مجموعه شبکه در بازه حدود ۱۰ تا ۳۶ هزارتایی انجام شد و تعداد شبکه ۲۵ هزارتایی همگرایی خوبی با تعداد شبکه‌های بالاتر داشت. همچنین نتایج با مقاله مرجع [۲۲] اعتبارسنجی شدند. با وجود برخی تفاوت‌ها نتایج شبیه‌سازی معتبر به نظر می‌رسد. اختلاف میان نمودارها می‌تواند به دلیل تفاوت در مواردی مانند نوع نرم افزار، سینتیک، شبکه‌بندی، مدل حرارتی دیواره‌ها و غیره باشد. برای مثال در مقاله مرجع مکانیسم GRI-Mech 2.11 (در مقابل GRI-Mech 3.0 در این کار) با نرم افزار "OpenFoam" استفاده شده است که نسخه‌های متفاوتی نسبت به این کار هستند. همچنین در مقاله مرجع، مدل احتراق "پیش مخلوط چند جزئی"^۲ در نظر گرفته شده در صورتی که کار ما بر اساس مدل "انتقال گونه‌ها"^۳ است و تشعشع نیز در نظر گرفته شده است.

دو نمونه انجام شده از استقلال حل در شکل ۵ و شکل ۶ مشخص شده است. همچنین دو نمونه انجام شده از اعتبارسنجی‌ها در شکل ۷ و شکل ۸ ارائه شده است. برای اطمینان از نتایج نمودارها در ۲ موقعیت مولفه طولی ثابت و مولفه عرضی ثابت رسم شده اند. لازم به توجه است، تعداد تکرار برای حل و همگرایی مناسب تا حدود ۱۷۰۰۰ ادامه پیدا کرد.

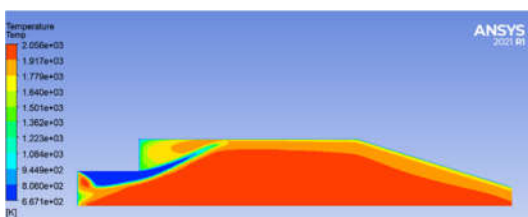
¹. OpenFOAM
². Partially Premixed
³. Species Transport

CO₂ در محصولات احتراق منجر به اتلاف حرارت کمتر توسط تجزیه شیمیایی و در نتیجه دمای شعله بالاتر می‌شود. نتایج عددی نیز گواه تضعیف تجزیه در فشار بالا است. کسر جرمی رادیکال OH در محفظه احتراق فشار بالا به طور مشخص کمتر از حالت جوی است [۱۴].

با توجه به نمودارهای رسم شده در شکل ۹ و شکل ۱۰، مشخص است که دما در محفظه احتراق با افزایش فشار، افزایش می‌یابد. طبعاً دمای شعله نیز افزایش پیدا کرده است. اختلاف دمای بیشینه در محفظه حدود ۲۰۰ درجه بین حالت جوی و پرفشار (۱۵ بار) مشاهده شد. شکل کلی توزیع دما با اینکه مشابه هم هستند ولی در برخی مناطق تفاوت‌هایی دارند که در ادامه قابل بحث است.



شکل ۹ - توزیع دما در محفظه احتراق حالت پرفشار (۱۵ بار)



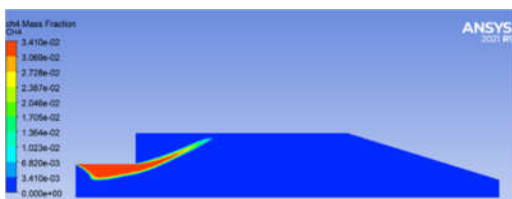
شکل ۱۰ - توزیع دما در محفظه احتراق حالت کم فشار (جوی)

۲-۳- ساختار شعله

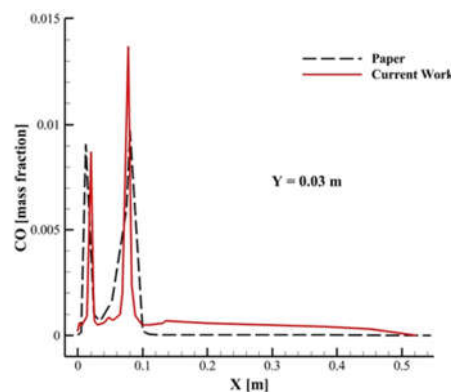
برای بررسی ساختار شعله، توزیع کسر جرمی متان رسم شد. البته بررسی مشخصه‌های دیگر هم می‌تواند به مشاهده ساختار شعله کمک کند؛ به مانند توزیع دما که در بخش قبلی ارائه شد. مطابق مطالعات ارائه شده در گذشته، مورد انتظار است که شعله کمی کوتاه‌تر و باریکتر شود.



شکل ۱۱ - کسر جرمی متان در محفظه احتراق حالت پرفشار (۱۵ بار)



شکل ۱۲ - کسر جرمی متان در محفظه احتراق کم فشار (جوی)



شکل ۸ - کسر جرمی CO به دست آمده در این کار و مقدار ارائه شده در مقاله مرجع [۲۲]

۳- نتایج

بر اساس مطالعات قبل می‌توان جمع بندی نمود که افزایش فشار (و به تبع آن دما) به طور قابل توجهی بر عملکرد احتراق از دو طریق فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی تأثیر می‌گذارد. در فیزیک، فشار و دما به طور مستقیم بر فرآیندهای آمیزه شدن و تبخیر سوخت (در صورت وجود سوخت مایع) تأثیر می‌گذارد. بنابراین، اندازه قطرات و توزیع فضایی تحت تأثیر قرار می‌گیرند و در نتیجه فرآیند اختلاط سوخت و گاز را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در شیمی، فشار و دما به طور قابل توجهی بر نرخ واکنش و واکنش‌های شیمیایی اساسی تأثیر می‌گذارد. بنابراین، سرعت انتشار حرارت احتراق تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به طور کلی، تغییرات دما و فشار ورودی بر موقعیت فضایی شعله و مشخصه‌های عملکردی احتراق در یک محفظه احتراق توربین گاز تأثیر می‌گذارد [۲۶].

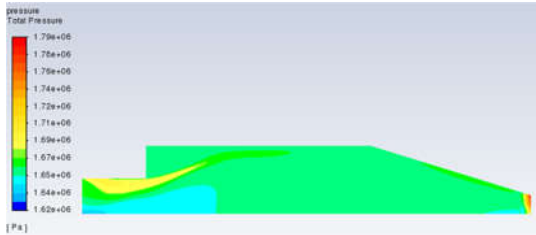
در ادامه توسط نرم افزار، اثر فشار بر برخی مشخصه‌های عملکردی محفظه احتراق بررسی می‌شود. دو فشار جوی و ۱۵ بار مورد بررسی قرار می‌گیرند تا تأثیر افزایش فشار مشاهده شود. همچنین دمای شعله یکی از مهمترین خواص در احتراق است زیرا تأثیر کنترلی بر سرعت یک واکنش شیمیایی دارد. دمای شعله توسط تعادل انرژی بین واکنش دهنده‌ها و محصولات در حالت تعادل تعیین می‌شود. اگر ناحیه واکنش از نظر مکانی در مقایسه با بقیه حوزه مورد نظر بسیار نازک باشد، در این صورت یک روش معمول است که حداکثر دمای منطقه واکنش را به عنوان دمای شعله نشان داد. مشاهده شده است که دمای شعله با فشار رابطه ضعیفی دارد [۱۹].

۳-۱- دما

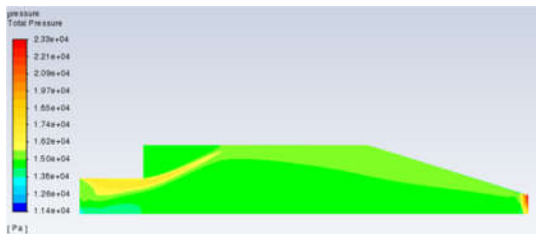
بدیهی است که افزایش فشار ورودی بر توزیع دما تأثیر می‌گذارد، به طوری که هم بالاترین دما در محفظه احتراق و هم دمای متوسط خروجی به طور همزمان افزایش می‌یابند. تغییرات دما در محفظه احتراق ناشی از تأثیر فشار بر تعادل شیمیایی است. واکنش‌های تجزیه برگشت‌پذیر زیادی در محفظه احتراق در دمای بالا وجود دارد. در همه موارد، تجزیه نیاز به افزایش تعداد کل مول‌های محصولات دارد. فیزیک فرآیند تعادل این است که افزایش فشار باعث جابجایی به مول‌های کمتری از محصولات می‌شود، یعنی تجزیه کمتر. افزایش مقادیر H₂O و

افت فشار کل به میانگین فشار کل ورودی (معادله ۵) تعریف می‌شود [۲۶]. با انجام محاسبات، با استفاده از فرمول ارائه شده مقدار افت فشار کل از حدود ۱ درصد به ۴ درصد افزایش یافت.

$$P_{loss} = \frac{\Delta P}{P_2} = \frac{P_2 - P_3}{P_2} \quad (5)$$



شکل ۱۵ - توزیع فشار کل در محفظه احتراق حالت پرفشار (۱۵ بار)



شکل ۱۶ - توزیع فشار کل در محفظه احتراق حالت کم فشار (جوی)

۵-۳- بازده احتراق

اگر بازده احتراق پایین باشد، سوخت به طور کامل نمی‌سوزد و هیدروکربن‌های نسوخته و مونوکسید کربن تولید می‌شود. بازده احتراق برای یک موتور هوایی غیرنظامی می‌تواند در شرایط عملیاتی معمولی بیش از ۹۹٪ و برای موتورهای هوایی نظامی در هنگام شرایط زمینی کمتر از ۹۸٪ باشد. به طور خاص برای موتورهای هوانوردی غیرنظامی، استانداردهای انتشار آلاینده‌های هوا مانند CO و NO سخت‌تر می‌شوند، که منجر به مشکل در طراحی محفظه احتراق مدرن برای موتورهای هوانوردی غیرنظامی می‌شود. علاوه بر این، برای بررسی عملکرد احتراق یک محفظه احتراق توربین‌گاز، اکثر آزمایش‌ها تقریباً در فشار محیطی انجام می‌شوند که کاملاً با شرایط کاری واقعی متفاوت است. فشار و دمای ورودی تأثیرات مهمی بر واکنش‌های شیمیایی اساسی احتراق دارند. بنابراین، ساده کردن شرایط ورودی بر اساس معیار تشابه دشوار است. در نتیجه، مطالعه تأثیر شرایط ورودی بر عملکرد احتراق یک توربین‌گاز ضروری است [۲۶].

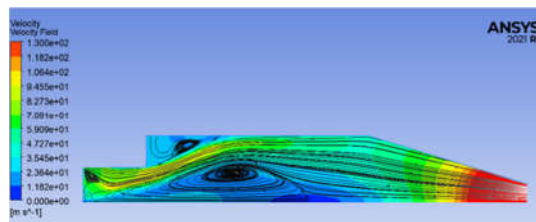
بازده احتراق یکی از پارامترهای کلیدی برای ارزیابی عملکرد محفظه احتراق است. بازده احتراق به عنوان درصدی از انرژی شیمیایی موجود در سوخت تعریف می‌شود که در محفظه احتراق به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود. مصرف سوخت ویژه^۱ و مصرف سوخت کل هر دو متناسب با بازده احتراق هستند. محفظه‌های احتراق مدرن معمولاً به سطوح بازده احتراق بالای ۹۹/۹ درصد در بیشتر محدوده عملیاتی خود می‌رسند، با بازده بالاتر از ۹۵ درصد در شرایط زمینی [۲۲].

¹ Specific Fuel Consumption (SFC= \dot{m}_{fuel} / τ)

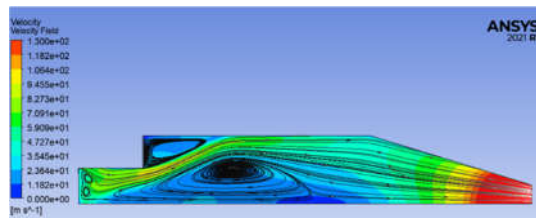
با بررسی توزیع دما در شکل ۹ و شکل ۱۰ و کسر جرمی متان در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ مشاهده شد که طول شعله در حالت پرفشار کمتر شده و همچنین شعله اندکی نازکتر است. اما به طور کلی با توجه به افزایش فشار، شکل کلی شعله در این محفظه را می‌توان مشابه در نظر گرفت. در واقع با وجود کاهش قابل توجه فشار از ۱۵ به ۱ اتمسفر، تغییر قابل توجهی در شکل کلی شعله رخ نداده است لذا امکان استفاده از آزمون جوی به منظور مطالعه محفظه احتراق در این محفظه وجود دارد.

۳-۳- میدان جریان

میدان جریان و تابع جریان در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ رسم شده است. تاثیر اندکی از فشار مشاهده شده و نواحی چرخشی تا حد زیادی مشابه هم هستند. اختلاف زیادی میان میدان سرعت و تابع جریان مشاهده نمی‌شود. مطابق مراجع [۱۴،۱۳] نیز انتظار این بود که هم میدان جریان متوسط و هم گرادیان جریان برشی تقریباً مستقل از فشار باشند.



شکل ۱۳ - میدان سرعت کل و تابع جریان در محفظه احتراق حالت پرفشار (۱۵ بار)



شکل ۱۴ - میدان سرعت کل و تابع جریان در محفظه احتراق حالت کم فشار (جوی)

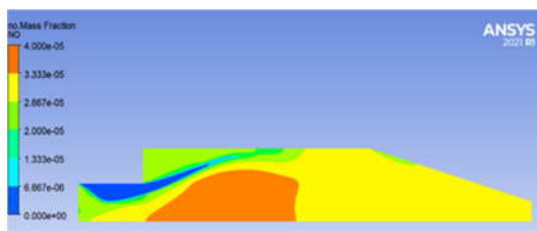
۳-۴- افت فشار

یکی دیگر از جنبه‌های مهم عملکردی محفظه احتراق، میزان افت فشار است. افت فشار کل یک محفظه احتراق مدرن معمولاً ۶-۴ درصد فشار کل ورودی است. افت فشار محفظه احتراق برای ایجاد توزیع یکنواخت جریان هوا، اختلاط سریع سوخت و هوا در محفظه و خنک سازی موثر محفظه احتراق استفاده می‌شود. افزایش ۱٪ افت فشار می‌تواند منجر به افزایش ۱٪ در مصرف سوخت ویژه و کاهش ۱٪ در تراست خالص موتور بسته به چرخه موتور شود. بنابراین، دستیابی به افت فشار کم بسیار مهم است. افت فشار کل منعکس کننده طراحی آپروپدینامیکی احتراق است و از دو جزء تشکیل شده است؛ تلفات مقاومت جریان و مقاومت گرمایی. ضریب افت فشار کل به عنوان نسبت

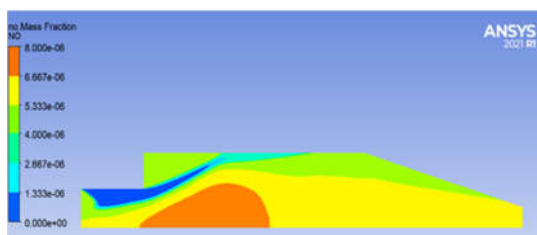
افزایش غلظت واکنش‌دهنده با فشار ورودی باعث می‌شود که مطابق قوانین تعادل، واکنش‌های شیمیایی موثر در محفظه در جهت مثبت جلو بروند. بنابراین، بازده احتراق با افزایش فشار ورودی، مطابق با آزمایش محفظه احتراقی خاص، توسط یان و همکاران [۲۶] افزایش می‌یابد.

۳-۶- آلاینده‌ها

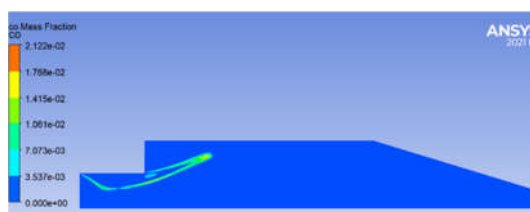
مهمترین آلاینده‌ها در توربین‌های گاز، اکسیدهای نیتروژن و مونوکسید کربن هستند. توزیع کسر جرمی آلاینده‌های CO و NO رسم شده‌اند. در شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ مشخص است که مقدار CO در حالت پرفشار کمتر از حالت جوی است و برخلاف CO، مقدار NO در حالت پرفشار بیشتر از حالت جوی است.



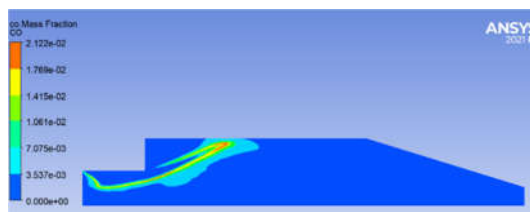
شکل ۱۹ - توزیع کسر جرمی NO در محفظه احتراق حالت پرفشار (۱۵ بار)



شکل ۲۰ - توزیع کسر جرمی NO در محفظه احتراق حالت کم فشار (جوی)



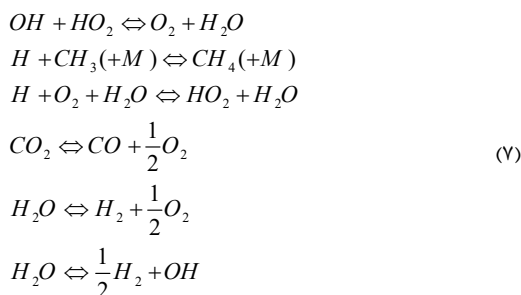
شکل ۱۷ - توزیع کسر جرمی CO در محفظه احتراق حالت پرفشار (۱۵ بار)



شکل ۱۸ - توزیع کسر جرمی CO در محفظه احتراق حالت کم فشار (جوی)

۳-۷- رادیکال‌های OH, O, H

در کاهش سرعت شعله آرام با افزایش فشار احتمالاً چند واکنش ذکر شده در معادلات (۷) نقش دارند. این واکنش‌ها واکنش‌های تجزیه‌ای هستند که باعث کاهش غلظت رادیکال‌های OH, O, H می‌شوند. سرعت این واکنش‌ها تا فشار اولیه ۶ اتمسفر ناچیز است. این واکنش‌ها در فشار بالا فعال‌تر هستند و سرعت واکنش آن‌ها با افزایش فشار با سرعت بالای برخورد مولکول‌ها در فشار بالاتر در طی واکنش‌های احتراق افزایش می‌یابد. افزایش سرعت این واکنش‌ها باعث مصرف رادیکال‌های آزاد می‌شود که منجر به سرعت کمتر انتشار رادیکال‌های آزاد می‌شود. این در نهایت سرعت انتشار شعله در مخلوط را با افزایش فشار واکنش به تاخیر می‌اندازد [۲۷].



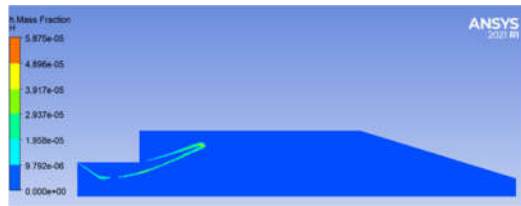
همانطور که بحث شد، غلظت رادیکال به دلیل تغییر در شیمی کلی با تغییرات فشار، به شدت به فشار وابسته است. سرعت شعله آرام

تأثیر فشار بر تشکیل آلاینده NO_x در موتورهای عملکرد بالا، اهمیت ویژه‌ای دارد. آزمایش احتراق در فشارهای بالا بسیار گران است و بنابراین انجام آزمایش‌های احتراق در سطوح فشار پایین و سپس تعمیم نتایج به دست‌آمده به سطوح فشار بالا که در آن انتشار به بالاترین مقدار خود می‌رسد، آسان‌تر است. رابطه بین فشار و NO_x به سادگی به دست نمی‌آید. رابطه زیر برای نسبت این دو مشخصه در محفظه‌های احتراق مرسوم پیشنهاد شده است:

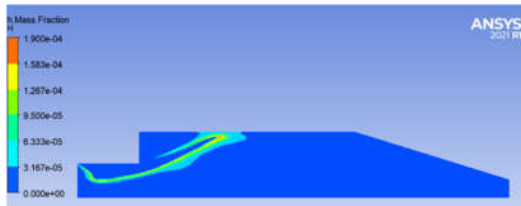
$$NO_x \propto P^n \tag{6}$$

که n در معادله (۶) دارای مقادیری از حدود ۰/۵ تا حدود ۰/۸ است. در آزمایشی با محفظه احتراق دارای سوخت گاز طبیعی افزایش در n با افزایش دمای گاز خروجی مشاهده شد [۶].

دلیل کاهش CO با افزایش فشار این است که متمیز شدن و تاخیر سوخت بهبود می‌یابد و نسبت برخوردهایی که می‌توانند بر انرژی فعال‌سازی واکنش غلبه کنند با افزایش دمای ورودی افزایش می‌یابد و در نتیجه احتراق کامل‌تر و بازده احتراق نیز افزایش می‌یابد. این منجر به انتشار کمتر CO می‌شود. علاوه بر این، ثابت تعادل



شکل ۲۵ - توزیع کسر جرمی H در محفظه احتراق حالت پرفشار (بار)



شکل ۲۶ - توزیع کسر جرمی H در محفظه احتراق حالت کم فشار (جوی)

۴- نتیجه‌گیری

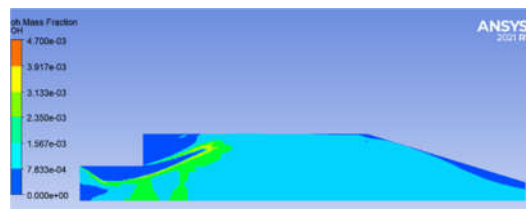
در این مقاله سعی شد اثر فشار بر مشخصه‌های محفظه احتراق توربین گاز به صورت نظری و عددی بررسی شود. در آخر، نتایج زیر به اختصار حاصل شده است:

- نرخ واکنش‌ها نقش مهمی بر اثر تغییر دما و فشار ایفا می‌کند.
- مقدار دما با افزایش فشار، به دلیل اثرات تعادل شیمیایی واکنش‌ها افزایش می‌یابد.
- میدان جریان تاثیر قابل توجهی از فشار نمی‌گیرد.
- افت فشار محفظه با افزایش فشار، افزایش می‌یابد.
- آلاینده CO با افزایش فشار کاهش می‌یابد ولی NO_x افزایش قابل توجهی دارد.
- اکثر نتایج آزمون‌های جوی، قابل مقیاس کردن و تعمیم به حالت پرفشار می‌باشد.

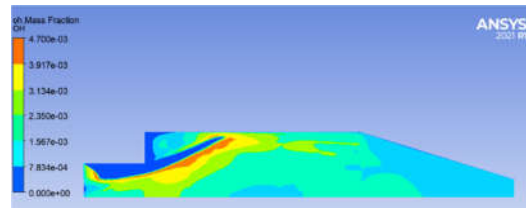
مهمترین نتیجه در این مطالعه، این است که در محفظه احتراق مورد نظر، با توجه به اینکه کاهش قابل توجه فشار، تاثیر زیادی بر روی شکل شعله و میدان جریان درون محفظه احتراق نداشته است، لذا می‌توان از آزمون جوی به منظور مطالعه کلی رفتار این محفظه احتراق استفاده نمود. این مورد، مهمترین حاصل این مطالعه است و نشان می‌دهد در محفظه احتراق مورد نظر، لزومی به استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی فشار بالا به منظور مطالعه جامع پدیده‌ها در صورت بهینه‌سازی و ارتقا وجود ندارد و می‌توان از تست‌های جوی بهره برد. دلیل اهمیت این جمع‌بندی این است که در برخی محفظه‌های احتراق ممکن است با کاهش فشار، تغییر شکل فاحشی در ساختار شعله رخ داده و در این صورت، رفتار محفظه احتراق با استفاده از تست جوی قابل پیش‌بینی نخواهد بود. لذا لازم است رفتار محفظه در فشار پایین حتماً شبیه‌سازی شده و پیش از انجام مطالعات جوی، عدم تغییر شکل شعله در مقایسه با به فشارهای عملکردی بالا به اثبات رسیده باشد.

با کاهش غلظت رادیکال کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است بیشترین سرعت شعله در نسبت هم ارزی حدود $\phi=1/1$ مشاهده شده است [۲۷].

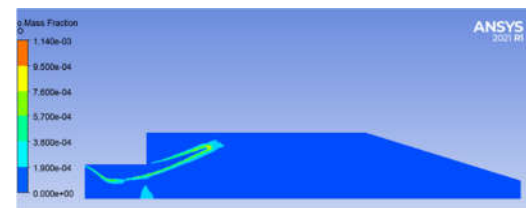
مقادیر رادیکال‌های O, H, OH که سهم مهمی در تاثیر فشار بر دما و سرعت شعله آرام دارند، در شکل‌های ۲۱ تا ۲۶ رسم شده اند. واکنش‌های تجزیه برگشت‌پذیر زیادی در محفظه احتراق در دمای بالا وجود دارد. در همه موارد، تجزیه نیاز به افزایش تعداد کل مول‌های محصولات دارد. فیزیک فرآیند تعادل این است که افزایش فشار باعث جابجایی به مول‌های کمتری از محصولات می‌شود، یعنی تجزیه کمتر. افزایش مقادیر H₂O و CO₂ در محصولات احتراق منجر به اتلاف گرمای کمتر توسط تجزیه شیمیایی و در نتیجه دمای شعله بالاتر می‌شود. نتایج عددی نیز گواه تضعیف تجزیه در فشار بالا است. همچنین، ضریب جذب و تشعشع نیز در محفظه افزایش می‌یابد.



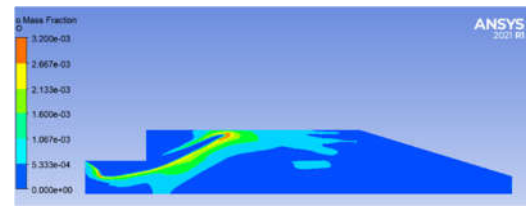
شکل ۲۱ - توزیع کسر جرمی OH در محفظه احتراق حالت پرفشار (بار)



شکل ۲۲ - توزیع کسر جرمی OH در محفظه احتراق حالت کم فشار (جوی)



شکل ۲۳ - توزیع کسر جرمی O در محفظه احتراق حالت پرفشار (بار)



شکل ۲۴ - توزیع کسر جرمی O در محفظه احتراق حالت کم فشار (جوی)

۵- نمادها

c	غلظت، mol/m ³
D	ضریب انتشار، m ² /s
F _b	نیروی حجمی، N
K	رسانایی گرمایی
S _g	منبع تولید انرژی، kJ/s
k	انرژی جنبشی آشفستگی، J
n	توان فشار، بدون بعد
m _{fuel}	دبی جرمی سوخت، kg/h
P	فشار، Pa
T	دما، K
t	زمان، s
u	مولفه افقی سرعت، m/s
v	مولفه عمودی سرعت، m/s
ε	نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفستگی، J/s
ρ	چگالی، kg/m ³
$\bar{\tau}$	تانسور تنش برشی، Pa
τ	جلوبرندگی (تراست)، N
φ	نسبت هم ارزی، بدون بعد
زیرنویس	
2	ورودی محفظه احتراق
3	خروجی محفظه احتراق
fuel	سوخت
i	مولفه iام
j	مولفه jام
loss	اتلاف

۶- مراجع

- Stability in the GT-110 Low-Emission Combustion Chamber 1. Power Technology and Engineering. 2017 Mar;50:620-4.
- [10] Nguyen TH, Park J, Sin C, Jung S, Kim S. Numerical Investigation of the Pressure Effect on the NO_x Formation in a Lean-Premixed Gas Turbine Combustor. Energy & Fuels. 2021 Mar 25;35(8):6776-84.
- [11] Hassan MI, Aung KT, Faeth GM. Measured and predicted properties of laminar premixed methane/air flames at various pressures. Combustion and flame. 1998 Dec 1;115(4):539-50.
- [12] Griebel P, Schaeren R, Siewert P, Bombach R, Inauen A, Kreutner W. Flow field and structure of turbulent high-pressure premixed methane/air flames. InTurbo Expo: Power for Land, Sea, and Air 2003 Jan 1 (Vol. 36851, pp. 301-310).
- [13] Soika A, Dinkelacker F, Leipertz A. Pressure influence on the flame front curvature of turbulent premixed flames: comparison between experiment and theory. Combustion and flame. 2003 Feb 1;132(3):451-62.
- [14] Cui Y, Xu G, Yu B, Nie C, Huang W. The effects of pressure on gas turbine combustor performance: an investigation via numerical simulation. InTurbo Expo: Power for Land, Sea, and Air 2006 Jan 1 (Vol. 42363, pp. 533-540).
- [15] Ibrahim TK, Rahman MM. Effect of compression ratio on performance of combined cycle gas turbine. International journal of energy engineering. 2012 Aug;2(1):9-14.
- [16] Goswami M, Coumans K, Bastiaans RJ, Konnov AA, De Goey LP. Numerical simulations of flat laminar premixed methane-air flames at elevated pressure. Combustion Science and Technology. 2014 Nov 2;186(10-11):1447-59.
- [17] Ratzke A, Schöffler T, Kuppa K, Dinkelacker F. Validation of turbulent flame speed models for methane-air-mixtures at high pressure gas engine conditions. Combustion and Flame. 2015 Jul 1;162(7):2778-87.
- [18] Wang X, Jin T, Xie Y, Luo KH. Pressure effects on flame structures and chemical pathways for lean premixed turbulent H₂/air flames: Three-dimensional DNS studies. Fuel. 2018 Mar 1;215:320-9.
- [19] Sakhrieh A. The adiabatic flame temperature and laminar flame speed of methane premixed flames at varying pressures. Acta Periodica Technologica. 2019(50):220-7.
- [20] Mei B, Ma S, Zhang Y, Zhang X, Li W, Li Y. Exploration on laminar flame propagation of ammonia and syngas mixtures up to 10 atm. Combustion and Flame. 2020 Oct 1;220:368-77.
- [21] Abou-Taouk A, Sadasivuni S, Lörst ad D, Eriksson LE. Evaluation of global mechanisms for LES analysis of SGT-100 DLE combustion system. InTurbo Expo: Power for Land, Sea, and Air 2013 Jun 3 (Vol. 55119, p. V01BT04A036). American Society of Mechanical Engineers.
- [22] Ren T, Modest MF, Roy S. Monte carlo simulation for radiative transfer in a high-pressure industrial gas turbine combustion chamber. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2018 May 1;140(5):051503.
- [23] Ansys I. Modeling turbulent flows-introductory fluent training. URL http://www.southampton.ac.uk/~nwb/lectures/GoodPracticeCFD/Articles/Turbulence_Notes_Fluent-v6.2006;3.
- [24] Ianni JC. A comparison of the Bader-Deuflhard and the Cash-Karp Runge-Kutta integrators for the GRI-MECH 3.0 model based on the chemical kinetics code Kintecus. InComputational fluid and solid mechanics 2003 2003 Jan 1 (pp. 1368-1372). Elsevier Science Ltd.
- [25] Ansys Inc. Governing Equations of Fluid Dynamics, in, 2022 <https://courses.ansys.com/index.php/courses/governing-equations-of-fluid-dynamics/>.
- [26] Yan Y, Liu Y, Huang L, Li J. Effects of inlet parameters on combustion performance in gas turbine combustor. International Journal of Turbo & Jet-Engines. 2018 Dec 19;35(4):339-50.
- [27] Kumar P, Kishan PA, Dhar A. Numerical investigation of pressure and temperature influence on flame speed in CH₄H₂ premixed combustion. International Journal of Hydrogen Energy. 2016 Jun 15;41(22):9644-52.
- [1] Boyce MP. Gas turbine engineering handbook. Elsevier; 2011 Nov 23.
- [2] KHODABANDEH A. CFD modelling of generic gas turbine combustor.
- [3] Vilag V, Vilag J, Carlanescu R, Mangra A, Florean F. CFD application for gas turbine combustion simulations. Computational Fluid Dynamics Simulations. 2019 Oct 22.
- [4] Çengel YA. Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer, McGraw-Hill. New York. 2008.
- [5] James A. Gas Turbine Combustion Chamber.
- [6] Arthur HL, Dilip RB. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions. CRC Press, Boca Raton, London, New York. 2010.
- [7] Martelli F, Riccio G, Benelli G, Cecchini D, Carrai L. Scaling from atmospheric pressure rig to full-scale pressure for the emission measurements from a gas turbine combustor. InTurbo Expo: Power for Land, Sea, and Air 2001 Jun 4 (Vol. 78514, p. V002T02A037). American Society of Mechanical Engineers.
- [8] Bhargava A, Kendrick DW, Colket MB, Sowa WA, Casleton KH, Maloney DJ. Pressure effect on NO_x and CO emissions in industrial gas turbines. InTurbo Expo: Power for Land, Sea, and Air 2000 May 8 (Vol. 78552, p. V002T02A017). American Society of Mechanical Engineers.
- [9] Bulysova LA, Vasil'ev VD, Beme AL, Gutnik MM, Gutnik MN. Effect of Pressure on NO_x Emissions and Combustion