

(علمی-پژوهشی)

مطالعه صدای منتشر شده محفظه احتراق توربین گاز مدل هنگام

چسبیدگی شعله به سر مشعل

در این مقاله، مطالعه میدان جریان یک محفظه احتراق توربین گاز مدل در حالت سرد برای کارکرد معمول و چسبیدگی شعله به سر مشعل به روش تجربی و نیز با کمک شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ انجام شده است. ابعاد هندسی پلنیوم و نتایج اندازه‌گیری تجربی صدای محفظه بیانگر تولید صدایی با فرکانس نزدیک به رزونانس پلنیوم دارد. برای بررسی اثر میدان جریان، از نتایج عددی برای کارکرد معمول مشعل و حالت شعله چسبیده استفاده شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که تغییر نسبت هوا میان چرخاننده بیرونی و داخلی به متمایل شدن لایه برشی خروجی به سمت سر مشعل و ایجاد جت کواندا روی دیواره منجر می‌شود. میدان جریان حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که در حالت چسبیدگی شعله به سر مشعل، ناحیه جریان بازگشتی داخلی سرعت‌های منفی کوچک‌تر به خود می‌گیرد و ناپایداری لایه برشی در خروجی نازل بیرونی و گردابه‌های آن در اثر چسبیدگی جریان به دیواره از بین می‌روند. حذف ناپایداری لایه برشی در خروجی یکی از نازل‌ها می‌تواند عامل حذف یکی از دو فرکانس پایه نوسانات و مضارب صحیح آن در اندازه‌گیری‌های تجربی باشد.

واژه‌های کلیدی: محفظه احتراق توربین گاز، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، جت کواندا،

آکوستیک

امیر مردانی^{۱*}، امیر آقا بیگی^{۱**} و حسنا باهنر^{۱***}

۱- دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا، تهران، ایران، کدپستی: ۱۴۵۸۸۹۶۹۴

* دانشیار (نویسنده پاسخگو)، ایمیل:

amardani@sharif.edu

** دانشجوی دکتری

*** دانشجوی کارشناسی ارشد

Study of Emitted Sound of a Gas Turbine Model Combustor When Flame Adheres to Burner Head

Experimental and numerical analysis of a gas turbine model combustor is performed for two cases of regular operation, and attached flow (Coanda jet). The flame shape is visualized experimentally to reveal the differences in the flame structure of the two cases. The combustor sound frequency is measured experimentally and is close to the plenum's resonance frequency. Analysis of the measured resonance sound in frequency space reveals two fundamental frequencies for the normal operation and only one for the case of attached flow. After verifying the numerical results for the cold flow of the burner under normal operation, numerical modeling of both cases is performed using a large eddy simulation. Numerical results predict the attachment of the flow (in the form of a Coanda jet) to the dump plane of the burner for a change in a split ratio of flow between the inner and outer nozzles. In the case of flow attachment, it is shown that less negative axial velocities exist at the chamber entrance and outer nozzle instability ceases. In this way, the plenum acts as a normal single neck Helmholtz resonator with one fundamental frequency for resonance when flow adheres to the burner head.

Keywords: Gas Turbine Model Combustor, Large Eddy Simulation, Coanda Jet, Acoustics

A. Mardani^{1*}, A. Aghabeigi^{2**}, and H. Bahonar^{1***}

1- Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Postal Code: 145889694, Tehran, IRAN

* Associate Professor (Corresponding Author): Email:

amardani@sharif.edu

** Ph.D. Student

*** M.Sc. Student

۱- مقدمه

محفظه احتراق توربین گاز مدل؛ با الگوی احتراقی نیمه پیش مخلوط همچون توربین‌های گازی واقعی در سال ۲۰۰۹ توسط مرکز هوافضای آلمان [۱] با دو هدف مطالعه آزمایشگاهی ساختار شعله و استخراج داده‌های آزمایشگاهی به منظور صحت‌سنجی مدل‌های عددی اغتشاشی و احتراقی و با بکارگیری تکنولوژی جریان پیچشی دو گانه توسعه داده شد. GTMC با استفاده از انژکتورهای پیچشی هم مرکز و احتراقی با میزان آلاینده‌گی بسیار پایین و بدون تولید دوده در کنار یک طراحی ایده‌آل به منظور حذف نواحی مختلف احتراقی درون محفظه و تزریق یک جای اکسند، طرحی قابل ارائه برای محفظه‌های احتراق واقعی می‌نماید. با این وجود، نیاز به مطالعات گسترده‌تر با جزئیات بیشتر و امکان‌سنجی برای به کارگیری این محفظه در توربین‌های گاز از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به GTMC، این محفظه به عنوان مدل فیزیکی این تحقیق انتخاب شده است. از این مشعل یک نمونه باز طراحی شده در دانشگاه صنعتی شریف ایجاد شده است [۲-۳] که برای بررسی‌های تجربی این مطالعه از آن استفاده شده است. شماتیک SGTMC در شکل ۱ نمایش داده شده است. این محفظه احتراق دارای دو ورودی هوا می‌باشد که به صورت هم محور وظیفه تزریق جریان پیچشی به محفظه را به عهده دارند و هر دو از یک مخزن مشترک تغذیه می‌شوند. صفحه شامل ورودی هوای مرکزی و سوخت در پایین دست ورودی هوای کناری و در فاصله ۴/۵ میلی‌متری از آن قرار دارد. قطر دهانه ورودی هوای مرکزی ۱۵ میلی‌متر، قطر داخلی ورودی هوای کناری ۱۷ میلی‌متر و قطر خارجی آن ۲۵ میلی‌متر است. نزدیک به ۴۰ درصد جریان ورودی به مخزن از ورودی هوای مرکزی و مابقی آن وارد ورودی هوای کناری می‌شود. جریان هوای مرکزی توسط ۸ کانال شعاعی تأمین می‌شود. این فرایند در ورودی کناری به واسطه ۱۲ کانال صورت می‌گیرد و بدین ترتیب جریان ایجاد شده توسط ورودی هوای کناری دارای پیچش بیشتری نسبت به جریان ورودی هوای مرکزی می‌باشد. جریان سوخت متان نیز توسط ۷۲ کانال به صورت غیر پیچشی از بین دو ورودی هوا وارد محفظه احتراق می‌شود. محفظه احتراق دارای مقطع مربعی شکل با ابعاد ۸۵ میلی‌متر بوده و ارتفاع آن ۱۱۴ میلی‌متر می‌باشد و یک صفحه مخروطی شکل آن را به آگروز استوانه‌ای شکل به قطر ۴۰ میلی‌متر و طول ۵۰ میلی‌متر متصل می‌نماید.



شکل (۱): شماتیک محفظه احتراق مورد مطالعه [۱].

محفظه‌های احتراق پیچشی از مفهوم پیچش به عنوان عامل اصلی پایداری شعله استفاده می‌کنند. این جریان پیچشی منجر به بروز ویژگی‌های خاصی در میدان جریان محفظه مانند پدیده شکست گردابه و هسته گردابه پیشرونده می‌شود که در این بخش به توضیح این موارد پرداخته خواهد شد. پدیده شکست گردابه و تشکیل ناحیه چرخشی داخلی یکی از ساختارهای حاکم بر محفظه‌های احتراق با درجه پیچش بالا می‌باشد. با ورود جریان هوای چرخشی به درون محفظه احتراق نیروی گریز از مرکز باعث مایل شدن جریان به سمت دیواره‌ها می‌شود. در نتیجه، ناحیه‌ای کم‌فشار روی محور طولی محفظه به وجود می‌آید. از طرفی، با پیشروی جریان به سمت پایین‌دست، اثرات اتلاف به کاهش سرعت مماسی و نیروی گریز از مرکز می‌انجامد که این مسئله باعث می‌شود فشار جریان روی محور طولی در بالادست کمتر باشد. در نتیجه این فرایندها در فاصله‌ای از ورودی‌ها، جریان چرخشی تمایل بازگشت به بالادست را خواهد داشت. همچنین، به واسطه وجود دیواره و اثرات برشی جریان ورودی، ناحیه بازگشتی خارجی در گوشه‌های بالادست محفظه تشکیل خواهد شد [۴]. شکل ۲ ساختار این نواحی بازگشتی را در مشعل مورد مطالعه نشان داده است.

یکی دیگر از پدیده‌های بسیار مهم موجود در جریان‌های پیچشی با درجه پیچش بالا، هسته گردابه پیشرونده می‌باشد [۶]. این پدیده یک پدیده سه‌بعدی و وابسته به زمان بوده و دارای حرکت مارپیچی حول محور اصلی مشعل می‌باشد. این پدیده در شکل ۳ که

1. Gas Turbine Model Combustor (GTMC)

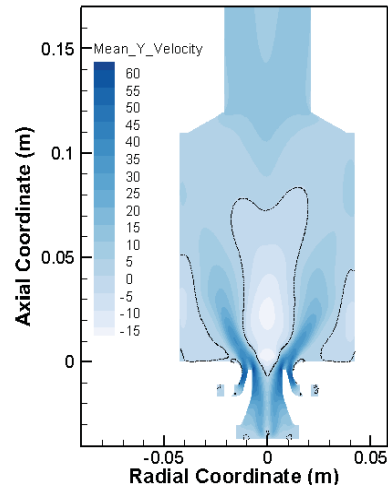
2. Sharif Gas Turbine Model Combustor (SGTMC)

این نقاط به دلیل حرکت مارپیچی هسته گردابه پیش‌رونده ثابت نبوده و در نقاط مختلف جریان پدید خواهند آمد. در این نقاط گازهای سوخته و نسوخته با یکدیگر برخورد کرده و مقدار قابل توجهی انتشار گرما در این نقطه اتفاق خواهد افتاد. این نقاط دارای نرخ واکنش بالایی بوده و به کمک پدیده هسته گردابه پیش‌رونده و انتقال شعله به پایین دست مانند یک منبع اشتعال برای ترکیب سوخت و هوای ورودی عمل کرده و نقش مهمی را در پایداری شعله ایفا می‌کند.

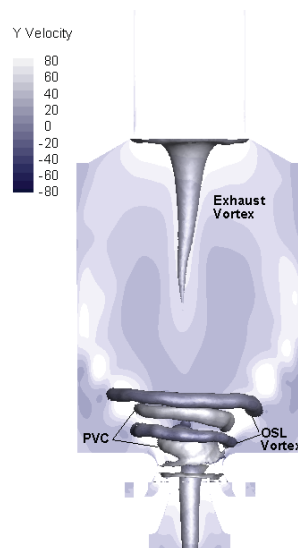
بر روی محفظه احتراق مورد بررسی در این تحقیق کارهای تجربی و عددی متعددی انجام شده است. یک کار تجربی گسترده در این مورد مرجع [۱] می‌باشد که به بررسی اثر تغییرات نسبت دبی سوخت و هوا روی پایداری شعله برای سه شعله متفاوت پرداخته است. در این پژوهش میزان غلظت گونه‌های شیمیایی، ساختار جریان و عناصر ناپایاکنده آن به صورت تجربی بررسی شده‌اند. همچنین، تاکنون مدل‌های توربولانسی مختلفی برای پیش‌بینی میدان جریان محفظه احتراق موردنظر در حل عددی استفاده شده‌اند. برای نمونه، مرجع [۷] با هدف بررسی اثرات دبی جریان ورودی هوا بر روی ساختارهای اصلی میدان جریان این محفظه (نواحی بازگشتی داخلی و خارجی و ناحیه گردابه‌ای) اقدام به حل جریان محفظه در سه دبی مختلف برای هوای ورودی با روش توربولانسی مدل کردن تنش‌های رینولدز کرده است. مراجع [۸-۹]، میدان جریان این محفظه احتراق را با استفاده از مدل توربولانسی RSM و مدل‌های احتراقی گوناگون بررسی و مدل احتراقی انتقال تابع چگالی احتمالی^۴ را در کنار مدل آشفتگی RSM برای پیش‌بینی صحیح میدان جریان آن مناسب ارزیابی کرده‌اند. مرجع [۱۰] با استفاده از رهیافت ترکیبی عددی-تجربی به بررسی عملکرد این هندسه در شعله‌های ایجاد شده با سوخت مایع پرداخته است و اثر انژکتور و فضای در اختیار قرار گرفته برای جریان را بر روی پایداری شعله و شکل آن در نظر گرفته است. مرجع [۱۱] حل سرد محفظه احتراق ذکر شده را با مدل‌های توربولانسی RNG، Realizable، RSM و RNG قابلیت داده و نشان داده است که مدل‌های RSM و RNG قابلیت مدل‌سازی فیزیک چرخشی این محفظه احتراق را دارند.

در سال ۲۰۰۹، سدندان و همکاران [۱۲] به نقش مهم و اساسی پدیده هسته گردابه پیش‌رونده در اختلاط گازهای نسوخته و

مربوط به یک مشعل مشابه می‌باشد، نمایش داده شده است. سیستم‌های احتراقی می‌توانند باعث تولید پدیده هسته گردابه پیش‌رونده شوند، اما اتفاق افتادن این پدیده تابعی از شدت چرخش جریان، هندسه مشعل، نسبت هم‌ارزی (نسبت سوخت به اکسنده در میدان جریان به سوخت به اکسنده حالت استوکیومتریکی)، شیوه تزریق سوخت و شکست گردابه منجر به ناحیه بازگشتی داخلی می‌باشد. این پدیده می‌تواند در اختلاط گازهای سوخته و نسوخته و در نتیجه پایداری شعله نقش ایفا کند. به علاوه در اثر تقابل جریان تازه ورودی با جریان بازگشتی نقاط سکونی در میدان جریان پدید می‌آید.



شکل (۲): نمونه نواحی جریان بازگشتی بیرونی و داخلی در داخل محفظه [۵].



شکل (۳): هسته گردابه پیش‌رونده در داخل محفظه [۵].

3. Reynolds Stress Model (RSM)
4. Transport Probability Density Function (TPDF)
5. Liquefied Petroleum Gas (LPG)
6. Sadanandan

رزونانس GTMC بیش‌تر تحت تأثیر حجم پلنیوم و انژکتورهاست و نقش اصلی را در ناپایداری احتراق آن ایفا می‌کند.

در این مقاله از شبیه‌سازی عددی برای بررسی صدای تولید شده از محفظه در حالت شعله چسبیده و برخاسته استفاده می‌شود. ابتدا با ارائه نتایج اندازه‌گیری تجربی به تفاوت صدای ضبط شده از برنر SGTMC دانشگاه شریف در دو حالت شعله چسبیده و برخاسته اشاره می‌شود. برای این تست‌ها از اندازه‌گیری صدا به کمک میکروفن در محل آگزوز استفاده شده است. برای اطمینان تست‌ها چندین بار تکرار شده‌اند و فرکانس صدای با بیش‌ترین دامنه به عنوان فرکانس حالت مربوطه در نظر گرفته شده است. در گام بعد، دلایل این تفاوت فرکانسی در میدان جریان محفظه و با کمک ابزار عددی و انتقال صدای ضبط شده به فضای فرکانس مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- مدل‌سازی حل مسئله

شمای محفظه احتراق مورد مطالعه، نوع شرایط مرزی به کار رفته و شکل نازل‌های آن به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۴ نشان داده شده‌اند. ورودی‌های هوا شامل یک ورودی مرکزی و یک ورودی حلقوی می‌باشد که پس از گذر از چرخاننده‌ها، وارد محفظه مکعبی شکل شده و از دودکش خارج می‌شود. هوا در دمای محیط وارد محفظه شده و با نسبت سه به دو بین ورودی حلقوی و مرکزی تقسیم می‌شود. به منظور حل معادلات حاکم از نرم‌افزار اختلاف محدود مبتنی بر حجم محدود (انسیس فلونت ۱۸) استفاده شده است. برای گسسته‌سازی معادلات روش مرتبه دوم برای زمان و مکان به کار برده شده و کوپل کردن معادلات فشار و سرعت از طریق روش‌های نیمه ضمنی انجام شده است. مدل سازی آشفستگی با کمک رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل زیرشبکه والس^{۱۵} صورت گرفته است. در این محاسبات، معیار همگرایی ۰/۰۰۱ برای حل معادلات انتقال در نظر گرفته شده است.

در این مقاله، مدل‌سازی در حالت سرد و بدون لحاظ کردن احتراق انجام شده است. برای اعمال شرط مرزی ورودی از

در نتیجه پایداری شعله پرداختند. اشتاینبرگ^۷ و همکاران [۱۳] به تحلیل اندرکنش‌های میدان جریان و شعله و همچنین نوسانات نرخ آزادسازی انرژی پرداختند و مشاهده کردند که فرکانس نرخ آزادسازی انرژی و نوسانات ترموآکوستیکی مشابه یکدیگر بوده و محل نوسانات آزادسازی انرژی با اندرکنش سطح شعله مرتبط می‌باشد. در سال ۲۰۱۲، اشتور^۸ و همکاران [۱۴] به تحلیل و بررسی اندرکنش هسته گردابه پیشرونده با یک شعله چرخشی با توان ۱۰ کیلووات پرداختند. نتایج مشاهدات نشان می‌دهد که هسته گردابه پیشرونده باعث ایجاد یک دنباله منظم از ترکیب گازهای سوخته و نسوخته، چرخش شعله و جرقه متوالی ترکیب ورودی در ناحیه جریان بازگشتی مرکزی می‌شود. همچنین، نتایج مطالعات نشان می‌دهد که هسته گردابه پیشرونده باعث القای نقاط سکون در میدان جریان می‌شود که محل این نقاط سکون با حرکت هسته گردابه پیشرونده دچار تغییر می‌شود. این نقاط سکون در میدان جریان متوسط‌گیری شده قابل مشاهده نیستند. ایسون^۹ و همکاران [۱۵] رفتار آکوستیک GTMC را با استفاده از سوخت‌های ترکیبی و سوخت‌های هیدروکربنی مورد مطالعه قرار دادند. در سال ۲۰۱۳، آیهمه^{۱۰} و همکاران [۱۶-۱۸] شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ را روی این محفظه اجرا کردند که در آن از روش فلت^{۱۲} برای مدل‌سازی احتراق این محفظه استفاده کردند. در این مقالات رفتار نشستن و بلند شدن لایه برشی برنر مورد بررسی پژوهش کنونی، بررسی شده است. از سال ۲۰۱۴، مردانی و همکاران [۱۹-۲۰] مطالعات خود را در جهت شناسایی رفتارها و پارامترهای موثر بر این مشعل آغاز کردند. آن‌ها در شبیه‌سازی‌های خود توانایی مدل RSM در پیش‌بینی ساختارهای اصلی جریان را نشان داده و با استفاده از مدل احتراقی مفهوم انتشار ادی^{۱۳} و مکانیزم DRM22 محاسبات حالت گرم آن را انجام دادند. در زمینه مطالعات تجربی نیز مردانی و همکاران [۲۰، ۲-۳] از سال ۲۰۱۶ به ساخت و شناسایی ناحیه پایداری شعله در مشعل SGTMC پرداختند. آن‌ها در این پژوهش به بررسی اثر وجود و عدم وجود دیواره روی ناحیه پایداری شعله، اثر پیش‌گرم‌سازی هوای ورودی در پایداری شعله و آلاینده‌های خروجی و همچنین اثر انژکتور پاشش سوخت بر روی پایداری شعله پرداختند. در زمینه رزونانس و آکوستیک GTMC کار مهم چن^{۱۴} و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۱۵ نشان داد که

7. Steinberg

8. Stohr

9. Allison

10. Ihme

11. Large Eddy Simulation (LES)

12. Flamelet

13. Eddy Dissipation Concept (EDC)

14. Chen

15. WALES

در شکل ۶ توزیع سرعت‌های محوری و مماسی متوسط‌گیری شده را با نتایج تجربی [۲۲] مقایسه و اثر اندازه شبکه را برای دو شبکه با اندازه‌های ۳/۳ میلیون و ۵/۹ میلیون سلول بررسی شده است. همان‌طور که مشخص است، در لایه برشی سرعت‌های محوری و مماسی بالایی وجود دارد که با انتقال به پایین دست از شدت آن‌ها کاسته شده و به سمت بیرون متمایل می‌شوند. حل تطبیق مناسبی با نتایج تجربی در فواصل مختلف از ورودی محفظه داشته است و اندازه شبکه ۳/۳ میلیون سلول برای محاسبات کنونی انتخاب شده است.

۳- نتایج و بحث

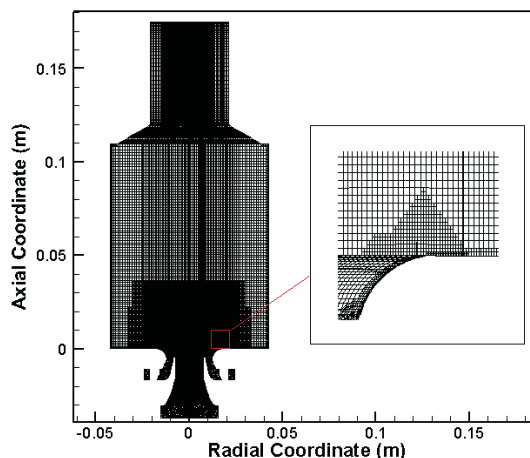
اندازه‌گیری تجربی فرکانس صوت تولید شده برای دو حالت شعله چسبیده و برخاسته با میکروفن (Marantz Audioscope SG-5BC) در محل آگروز محفظه احتراق انجام شده است. اندازه صدای تولیدی در حالت چسبیده (سوت ممتد) به اندازه‌ای می‌باشد که از اطراف برنر نیز قابل تشخیص بوده است. در شکل ۷ شمایل شعله مشاهده شده در آزمایشگاه برای این دو حالت نمایش داده شده است. در حالت برخاسته، شعله زاویه مشخصی را با سرمشعل می‌سازد.

شکل ۸ فرکانس‌های اندازه‌گیری شده را برای حالت‌های چسبیده و برخاسته نشان می‌دهد. برای بدست آوردن حالت‌های چسبیده و برخاسته در هر دبی سوخت، مقدار دبی هوا افزایش داده شده است تا گذار از حالت برخاسته به چسبیده صورت گیرد. فرکانس صدای حالت چسبیده فاصله قابل ملاحظه‌ای با حالت برخاسته دارد و کارکرد مشعل در این حالت همراه با تولید سوت ممتد در آزمایشگاه بوده است. اندازه فرکانس صدای حالت چسبیده بسیار نزدیک به مقدار تحلیلی رزونانس (هلمهولتز) متأثر از محفظه پلنیوم (حدود ۳۰۰ هرتز) می‌باشد که در کارهای قبلی نویسندگان و بقیه مراجع به آن اشاره شده است [۲۳، ۲۱]. برای داشتن دید بهتر از تمایز صدای ضبط شده در دو حالت شکل‌های ۹ و ۱۰ نوسانات فشاری (صدای ضبط شده) را در دو فضای زمان (خروجی مستقیم میکروفن) و فرکانس (حاصل تبدیل فوریه) به نمایش گذاشته‌اند. شکل ۹ نشان می‌دهد که دامنه نوسانات در حالت برخاسته بزرگتر است و در این حالت رفتارهای فرکانس بالا (قله‌های سوزنی شکل) تأثیر بیش‌تری روی فشار دارند. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که فرکانس پایه ۲۰۰ Hz و مضارب صحیح آن در حالت چسبیده از بین رفته و تنها فرکانس پایه دوم (۳۰۰ Hz و مضارب صحیح آن) باقی می‌ماند.

مشخص کردن دبی جرمی و برای اعمال شرط مرزی خروجی از مشخص کردن فشار (برابر فشار محیط) استفاده شده است. دیواره‌ها برای پژوهش کنونی آدیاباتیک فرض شده‌اند. مطالعه بر روی اثر اندازه شبکه با استفاده از دو شبکه با اندازه‌های ۳/۳ و ۵/۹ میلیون سلول انجام گرفته است. برای این تحقیق از شبکه ترکیبی هرمی (داخل چرخاننده) و شش‌وجهی (داخل محفظه) و تمرکز شبکه در ناحیه لایه برشی استفاده شده است. شکل ۵ تمرکز شبکه در این ناحیه را نشان می‌دهد.

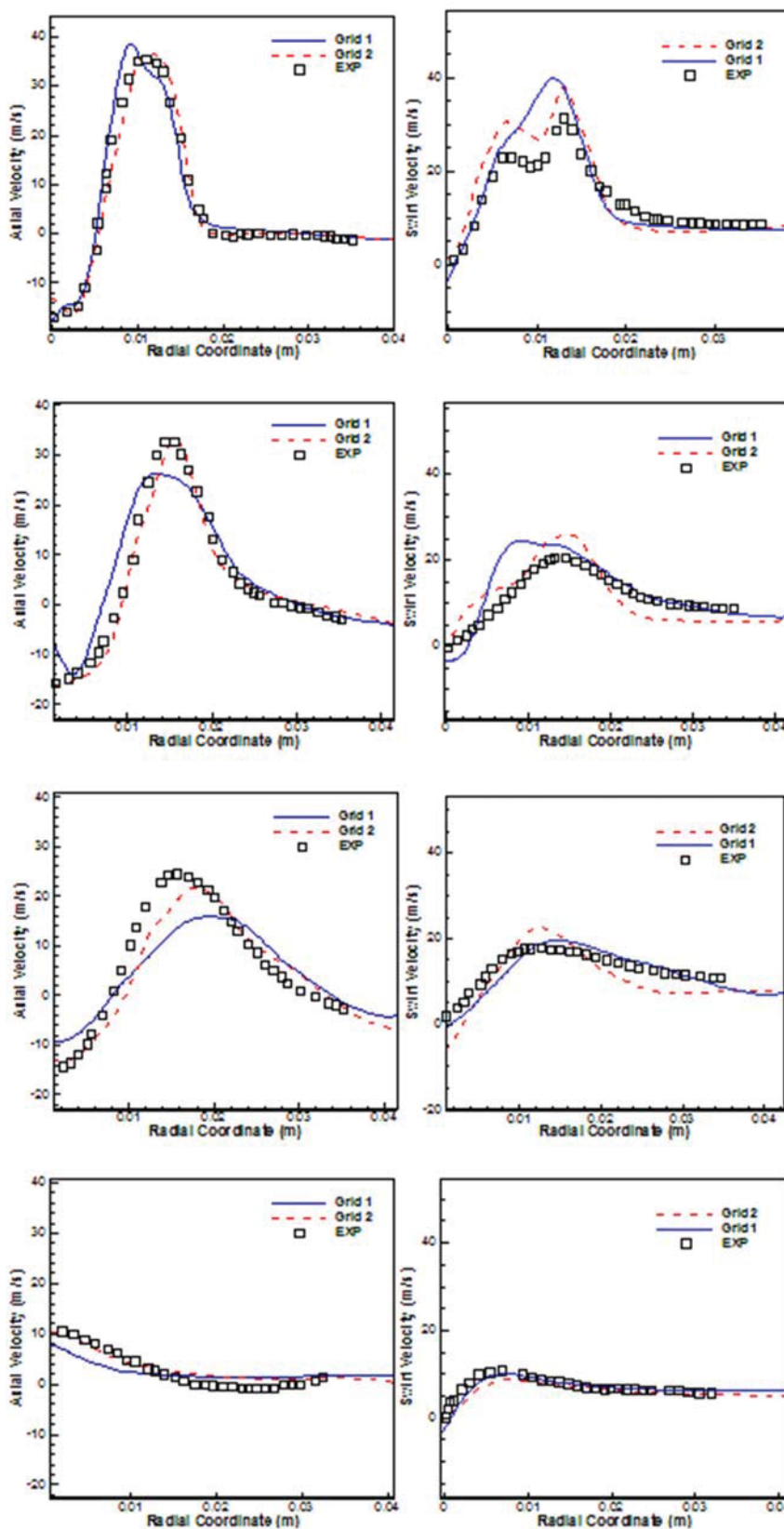


شکل (۴): محفظه احتراق SGTMC و نازل‌های ورودی هوا و سوخت به آن [۲]

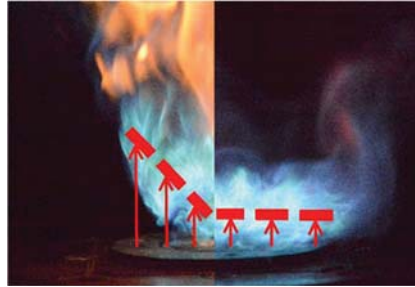
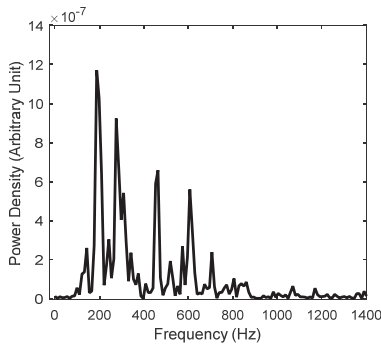
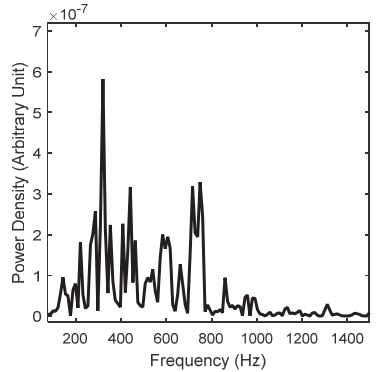


شکل (۵): نمای شبکه در سطح مقطع گذشته از میان محفظه.

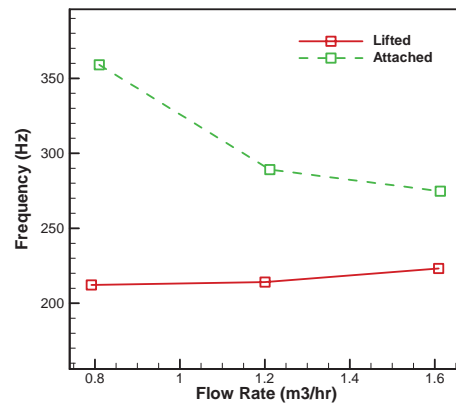
(علمی-پژوهشی)
امیر مردانی، امیر آقاییگی و حسنا باهنر



شکل (۶): مقایسه توزیع سرعت‌های محوری (چپ) و مماسی (راست) در فاصله‌های ۲/۵، ۱۰، ۲۰ و ۹۰ میلی‌متر از ورودی محفظه برای شبکه اول با ۳/۳ میلیون سلول و شبکه دوم با ۵/۹ میلیون سلول با نتایج تجربی [۲۲].



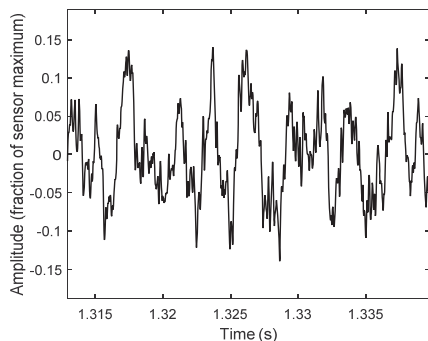
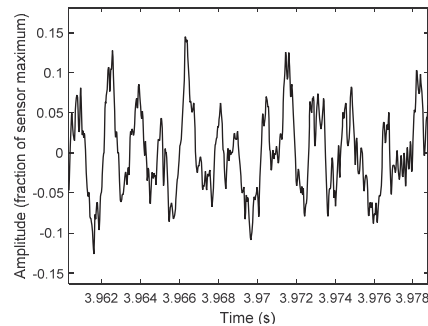
شکل (۷): سمت چپ شعله برخاسته با نسبت هم‌ارزی ۱/۰۷۲ و سمت راست شعله چسبیده با نسبت هم‌ارزی ۰/۶۷ با دبی سوخت ثابت ۰/۸ متر مکعب بر ساعت.



شکل (۱۰): توزیع صدای اندازه‌گیری شده (فشار آکوستیک) در فضای فرانس برای حالت‌های شعله چسبیده (بالا، نسبت هم‌ارزی ۰/۶۷) و برخاسته (پایین، نسبت هم‌ارزی ۱/۰۷) برای دبی سوخت $1.2 \text{ m}^3/\text{hr}$.

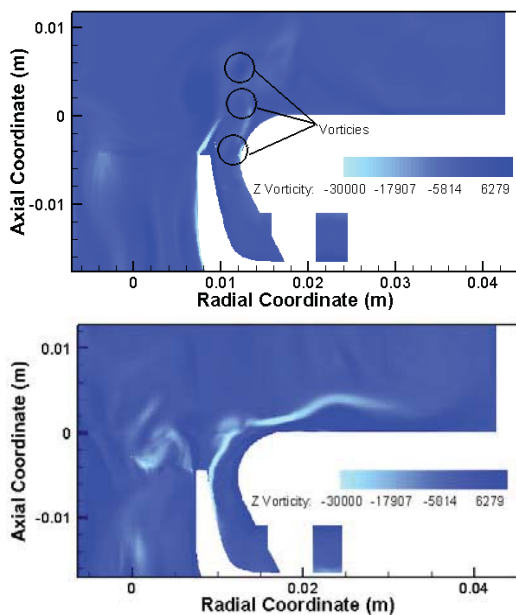
شکل (۸): فرانس صدای اندازه‌گیری شده در حالت‌های شعله چسبیده و برخاسته.

برای بررسی علت فرکانس‌های تولید شده، اقدام به بررسی میدان جریان از طریق رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ شده است. داشتن الگوی میدان جریان در حالت‌های برخاسته و چسبیده از تغییر نسبت تقسیم هوا بین دو چرخاننده از مقدار ۱/۴ به ۴ (در شرایط دبی آورده شده در شکل ۹) استفاده شده است [۱۷]. شکل ۱۱ خطوط جریان دو حالت چسبیده و برخاسته را به همراه توزیع اندازه سرعت متوسط بررسی کرده است. همانطور که مشخص است ناحیه چرخشی بیرونی در حالت چسبیده از بین رفته و ناحیه چرخشی میانی بسیار بزرگ می‌شود. شکل ۱۲ میدان سرعت محوری لحظه‌ای محاسبه شده را نشان می‌دهد. وجود گردابه‌های سیال در میدان جریان لحظه‌ای به دلیل وجود هسته گردابه پیشرونده در ناحیه لایه برشی می‌باشد. این گردابه‌ها به همراه لایه برشی در حالت چسبیده به سرمشعل چسبیده‌اند. نواحی سرعت منفی برای حالت چسبیده برخلاف برخاسته پراکنده بوده و نظم مشخصی ندارند و جریان به شدت آشفته و ناپایا می‌باشد. از شکل ۱۳ که توزیع چرخش لحظه‌ای در داخل صفحه را نشان می‌دهد، مشخص است که برخلاف حالت برخاسته که ناپایداری لایه برشی و تولید گردابه‌ها در خروجی هر دو نازل مرکزی و بیرونی وجود دارد، در حالت چسبیده نازل بیرونی تحت تاثیر چرخش ناشی از تنش حاصل از چسبیدن به دیواره قرار می‌گیرد. چسبیدگی جریان به دیواره نازل بیرونی و از بین



شکل (۹): شکل موج صدای خام اندازه‌گیری شده (فشار آکوستیک) در حالت‌های شعله چسبیده (بالا، نسبت هم‌ارزی ۰/۶۷) و برخاسته (پایین، نسبت هم‌ارزی ۱/۰۷) برای دبی سوخت $1.2 \text{ m}^3/\text{hr}$.

(علمی-پژوهشی)
امیر مردانی، امیر آقاییگی و حسنا باهنر

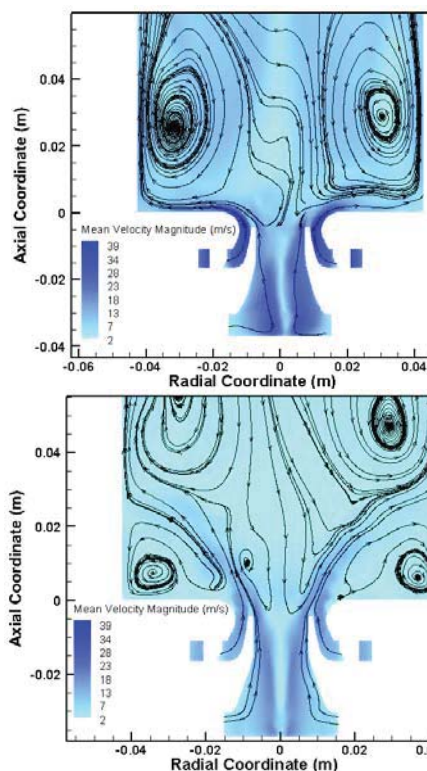


شکل (۱۳): توزیع چرخش لحظه‌ای داخل صفحه برای حالت چسبیده (بالا) و برخاسته (پایین)

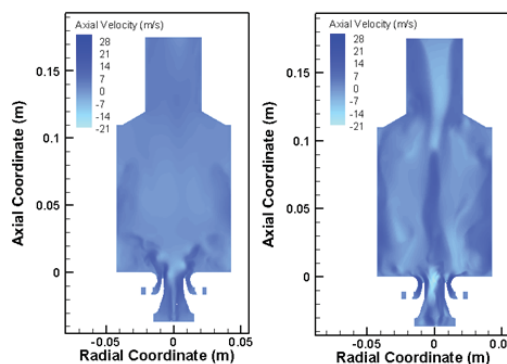
۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، میدان جریان و صدای تولید شده از یک محفظه احتراق توربین گاز مدل برای کارکرد معمول و حالت چسبیدگی شعله به سرمشعل با کمک روش عددی و اندازه‌گیری‌های صوتی بررسی شده است. نتایج اندازه‌گیری تجربی صدای محفظه و ابعاد هندسی پلنیوم نشان از اثر غالب رزونانس پلنیوم بر صدای تولید شده دارد. برای مطالعه میدان جریان دو حالت، از نتایج عددی برای کارکرد معمول مشعل و حالت شعله چسبیده استفاده شده است. تغییرات در نسبت جریان دو نازل پلنیوم می‌تواند منجر به چسبیدگی شعله به سرمشعل بیانجامد. میدان جریان حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان از سرعت‌های منفی کوچک‌تر در ناحیه جریان بازگشتی نازل مرکزی پلنیوم و اضمحلال ناپایداری‌های لایه برشی در خروجی نازل بیرونی برای حالت چسبیدگی شعله دارد. چسبیدگی شعله موجب اضمحلال ناپایداری‌های لایه برشی در خروجی نازل بیرونی پلنیوم می‌شود و می‌تواند سبب حذف یکی از دو فرکانس پایه نوسانات و مضارب صحیح آن در اندازه‌گیری‌های تجربی برای شعله چسبیده شده باشد. به این ترتیب پلنیوم در حالت چسبیدگی شعله به سرمشعل به عنوان یک رزوناتور متداول با یک گلوگاه و فرکانس رزونانس مشخص عمل می‌کند.

رفتن ناپایداری لایه برشی (که نقش اصلی را در تحریک اختلالات چرخشی منجر به رزونانس‌های هلمهولتز ایفا می‌کند [۲۳-۲۴]) می‌تواند عامل حذف یکی از فرکانس‌های پایه و مضارب صحیح آن برای حالت چسبیده در اندازه‌گیری‌های تجربی باشد. در واقع کاهش امکان رزونانس از نازل بیرونی به خاطر چسبیدگی جریان موجب تبدیل پلنیوم از یک رزوناتور دو دهانه در حالت شعله برخاسته که می‌تواند در فرکانس‌های متعددی رزونانس داشته باشد [۲۵]، به یک رزوناتور یک‌دهانه که با فرکانس پایه مشخص می‌شود.



شکل (۱۱): توزیع اندازه سرعت متوسط و خطوط جریان برای حالت چسبیده (بالا) و برخاسته (پایین).



شکل (۱۲): توزیع سرعت محوری لحظه‌ای برای حالت چسبیده (بالا) و برخاسته (پایین).

۸- مراجع

- [1] Weigand, P., Meier, W., Duan, X.R., Stricker, w., and Aigner, M., "Investigations of Swirl Flames in a Gas Turbine Model Combustor: I. Flow Field, Structures, Temperature, and Species Distributions", *Combustion and flame*, Vol. 144, No.1-2, pp. 205-224, 2006.
- [2] Mardani, A., Rezapour-Rastaaghi, H., and Fazlollahi Ghomshi, A., "Liquid Petroleum Gas Flame in a Double-Swirl Gas Turbine Model Combustor: Lean Blow-Out, Pollutant, Preheating", *Thermal Science*, Vol. 25, pp. 377-393, No. 1, 2020.
- [3] Mardani, A., Asadi, B., and Rezapour-Rastag, H., "Experimental Investigation on the Effects of Swirlers Configurations and Air Inlet Partitioning in a Partially-Premixed Double High Swirl Gas Turbine Model Combustor", *Journal of Energy Resources Technology: Transactions of the ASME*, Vol. 143, No. 1, P. 012302, 2021.
- [4] De Santis, A., Ingham, D.B., Ma, L., and Pourkashanian, M., "CFD Cfd Analysis of Exhaust Gas Recirculation in a Micro Gas Turbine Combustor for CO2 Capture", *Fuel*, Vol. 173, pp.146-154, 2016.
- [5] Mardani, A., Asadi, B., and Rezapour-Rastaghi, H., "Three Dimensional Numerical Investigation of Methane Partially Premixed Combustion in a Double Swirl Gas Turbine Combustor", *The 11th Mediterranean Combustion Symposium (MCS)*, Tenerife, Spain, 2019.
- [6] Syred, N., "A Review of Oscillation Mechanisms and the Role of the Precessing Vortex Core (PVC) In Swirl Combustion Systems", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 32, No. 2, pp. 93-161, 2006.
- [7] Mardani, A. and Rezapour-Rastaghi, H., "Investigation of the Effects of Inlet Air Flow on the Main Structures of the Flow Field in the Combustion Chamber of a Model Gas Turbine with Two-Way Air Inlet", *The 17th Fluid Dynamics Conference*, Shahrud, Iran, 2017 (In Persian).
- [8] Mardani, A. and Fazlollahi-Ghomshi, A., "Numerical Study of Combustion Flow in a Gas Turbine Combustion Chamber Model Using Different Combustion Models", *The 6th Fuel & Combustion Conference*, Mashhad, Iran, 2015 (In Persian).
- [9] Mardani, A. and Fazlollahi-Ghomshi, A., "Numerical Investigation of a Double-Swirl Gas Turbine Model Combustor Using a RANS Approach with Different Turbulence-Chemistry Interaction Models", *Energy & Fuels*, Vol. 30, No. 8, pp. 6764-6776, 2016.
- [10] Mardani, A., Rezapour-Rastaaghi, H., and Fazlollahi-Ghomshi, A., "Investigation of Lpg Flame Structure in Double Swirl Gas Turbine Model Combustor", *MCS 10*, Naples, Italy, 2017.
- [11] Mardani, A. and Fazlollahi-Ghomshi, A., "Numerical Study of Non-Combustion Flow Inside Gas Turbine Combustion Chamber Using Different Turbulence Models", *The 14th International conference of Iranian Aerospace Society*, Tehran, Iran, 2015 (In Persian).
- [12] Sadanandan, R., Stöhr, M., and Meier, W., "Simultaneous OH-PLIF and PIV Measurements in a Gas Turbine Model Combustor", *Applied Physics B: Lasers and Optics*, Vol. 90, pp. 609-618, 2008.
- [13] Steinberg, A.M., Boxx, I., Stöhr, M., Carter, C.D., and Meier, W., "Flow-flame Interactions Causing Acoustically Coupled Heat Release Fluctuations in a Thermoacoustically Unstable Gas Turbine Model Combustor", *Combustion and Flame*, Vol. 157, pp. 2250-2266, 2010.
- [14] Stöhr, M., Boxx, I., Carter, C.D., and Meier, W., "Experimental Study of Vortexflame Interaction in a Gas Turbine Model Combustor", *Combustion and flame*, Vol. 144, pp. 205-224, 2006.
- [15] Allison, P.M., "Experimental Characterization of Combustion Instabilities and Flow-Flame Dynamics in a Partially-Premixed Gas Turbine Model Combustor", *Ph.D. Dissertations*, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA, 2013.
- [16] See, Y.C. and Ihme, M., "Large Eddy Simulation of a Gas Turbine Model Combustor", *The 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Grapevine, Texas, USA, 2013.
- [17] See, Y.C. and Ihme, M., "LES Investigation of Flow Field Sensitivity in a Gas Turbine Model Combustor", *52nd Aerospace Sciences Meeting*, National Harbor, Maryland, USA, 2014.
- [18] See, Y.C. and Ihme, M., "Large Eddy Simulation of a Partially-Premixed Gas Turbine Model Combustor", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 35, pp.1225-1234, 2015.
- [19] Rezapour Rastaghi, H. "Experimental and Numerical Study of Gas Turbine Model Combustor", *M.Sc. Thesis*, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 2017.
- [20] Mardani, A. and Rezapour-Rastaghi, H., "Investigation of the Effects of Inlet Air Flow on the Main Structures of the Flow Field in the Combustion Chamber of a Model Gas Turbine with Torsional Air Inlet", *The 17th Fluid Dynamics Conference*, Shahrud, Iran, 2017 (In Persian).
- [21] Chen, Y. and Driscoll, J.F., "Experimental Studies and Modeling of Acoustic Instabilities in a Gas Turbine Model Combustor", *The 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Kissimmee, Florida, USA, 2015.
- [22] Benim, A.C., Iqbal, S., Nahavandi, A., Meier, W., Wiedermann, A., and Joos, F., "Analysis of Turbulent Swirling Flow in an Isothermal Gas Turbine Combustor Model", *ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, Düsseldorf, Germany, 2014.
- [23] Mardani, A., Agha Beige, A. and Bahonar, H. "Numerical Modelling of Resonance in Plenum Chamber of a Gas Turbine Model Combustor", *The 11th Mediterranean Combustion Symposium (MCS)*, Tenerife, Spain, 2019.
- [24] Heng, J., Thanapal, T.D., Chan, W.L., and Elhadidi, B., "Lattice Boltzmann Simulation on the Flow Behaviour Associated with Helmholtz Cavity-Backed Acoustic Liners", *Journal of Visualization*, Vol. 23, pp. 625-633, 2020.
- [25] Etaix, N., Crawford, K., Voisey, R., and Hopper, H., "Redesigning Helmholtz Resonators to Achieve Attenuation at Multiple Frequencies", *International Congress on Acoustics*, Buenos Aires, Argantin, 2016.