دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی

شبیه سازی عددی محفظه احتراق توربین گاز V94.2

نگارش

حسین آزادی

استاد راهنما

دکترمسعود ضیاء بشرحق

استاد مشاور

دکتر رضا ابراهیمی

شهریور ۱۳۸۹

ای نام تو بهترین سرآغاز بی نام تو نامه کی کنم باز

به نام یزدان پاک

تقدیم به

سردار عاشورایی خیبر،

شهید **حاج محمد ابراهیم همت**؛

و به همسر مهربان و فداکارم به پاس یاری، همراهی و شکیبائیش؛

و به مادرم، اسوه مهر و ایثار و پدرم، اسوه شکیبایی، استقامت و تلاش به پاس سالها فداکاری و از خودگذشتگی.

بسمه تعالی

تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاییدیه هیات داوران

شماره:

تاریخ

هیات داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان:

شبیه سازی عددی محفظه احتراق توربین گاز V94.2

توسط آقای **حسین آزادی**، صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکانیک** گرایش **تبدیل انرژی** در تاریخ **۱۳۸۹/۰۶/۳۱** مورد تایید قرار می‌دهند.

۱- استاد راهنما	جناب آقای دکتر مسعود ضیاء بشرحق	امضاء
۲- استاد مشاور	جناب آقای دکتر رضا ابراهیمی	امضاء
۳- ممتحن داخلی	جناب آقای دکتر علی کشاورز	امضاء
۴- ممتحن داخلی	جناب آقای دکتر مهرزاد شمس	امضاء
۵- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده	جناب آقای دکتر علی کشاورز	امضاء

اظهارنامه

موضوع پایان نامه: **شبیه سازی عددی محفظه احتراق توربین گاز** V94.2

نام دانشجو: **حسین آزادی**

شماره دانشجویی: **۸۶۰۵۰۹۴**

استاد راهنما: **دکتر مسعود ضیاء بشرحق**

اینجانب **حسین آزادی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد **مهندسی مکانیک** گرایش **تبدیل انرژی** دانشکده **مهندسی مکانیک** دانشگاه **صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی** گواهی می‌دهد که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تایید می‌باشد و در موارد استفاده از آثار سایر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. همچنین گواهی می‌دهد مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فردی در جای دیگری ارائه نشده است.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هر گونه کپی برداری به صورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تا زمان حیات نویسنده و استاد راهنما تنها با موافقت آنها و در غیر اینصورت با موافقت کتابخانه دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

۳- همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

سپاس بی پایان خداوند یکتا را که در تمامی مراحل مختلف انجام این اثر یاریگر و هدایتگر بنده ناچیزش بود و بی لطف و عنایت بیکران او خلق این اثر ممکن نبود.

لازم میدانم از زحمات ارزنده استاد راهنمای ارجمندم جناب آقای دکتر مسعود ضیاء بشرحق و استاد مشاور گرانقدرم جناب آقای دکتر رضا ابراهیمی که در پیدایش اثر حاضر راهنمای بنده بوده‌اند تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین مراتب سپاس خود را از پرسنل گرانمایه شرکت محترم توگا- بخش مهندسی توربین گاز- آقای مهندس نظام آبادی، آقای مهندس رشیدی، آقای مهندس شیرزادی و آقای مهندس توفیقی که در انجام تحقیق حاضر یاریگر اینجانب بوده‌اند اعلام می‌دارم.

و تشکر پایانی از همه اساتید، علما و دانشجویانی که آثار گرانقدرشان به عنوان منبع در خلق این اثر مورد استفاده قرار گرفت.

بی‌شک پاداش این عزیزان نزد ایزد بخشاینده محفوظ خواهد ماند.

همواره از خداوند دانا و توانا برای خدمت به این دیار پاک مدد جسته و روزی را در انتظارم که فرزندان غیور میهنم به ایرانی بودن خویش بر خود ببالند.

چکیده

در این تحقیق محفظه احتراق توربین گاز V94.2 از خروجی کمپرسور تا خروجی محفظه احتراق به صورت عددی شبیه سازی گردید. به دلیل هزینه بالای محاسبات عددی یک قطاع ۴۵ درجه از کل محفظه احتراق مدل شد. هوای فشرده خروجی از کمپرسور از محفظه هوای اطراف محفظه احتراق عبور می‌کند. بخش عمده این هوا از سویرل مورب در ورودی محفظه احتراق عبور می‌کند و بخش دیگر آن از سوراخهای موجود در دیواره Flame Tube وارد محفظه احتراق می‌شود. مهمترین مسائل موجود در این شبیه سازی عددی نحوه مدلسازی آشفتگی، انتقال حرارت تشعشعی و احتراق بود. آشفتگی با استفاده از مدل دو معادله‌ای Realizable K-ε مدل شد. جهت مدلسازی انتقال حرارت تشعشعی در محیط جاذب و صادر کننده از مدل P-1 استفاده گردید. واکنش احتراقی با استفاده از مدل نرخ محدود عمومی مدلسازی شد و نرخ واکنش با استفاده از مدل اتلاف گردابه‌ای (EDM) محاسبه گردید. برای بررسی استقلال حل عددی از تعداد سلولهای شبکه دو نوع شبکه محاسباتی ایجاد گردید. دمای خروجی و کسر جرمی گونه‌های شیمیایی در خروجی محفظه احتراق همچنین افت فشار از خروجی کمپرسور تا خروجی محفظه احتراق با اطلاعات تجربی مقایسه گردید. در حالی که خروجی‌های حل عددی در خصوص دو مورد اول نزدیکی بسیار خوبی با اطلاعات تجربی داشت، مدل تهیه شده قادر به پیش بینی صحیح افت فشار بر اساس اطلاعات تجربی نبود.

خروجی‌های حل عددی در خصوص میدانهای جریان، دما و کسر جرمی گونه‌ای شیمیایی تا حد قابل قبولی منطبق بر تحلیلهای علمی موجود در متون علمی بود. وجود یک ناحیه بازچرخش در خروجی سویرل به محفظه احتراق نشان دهنده وجود یک ناحیه بازچرخشی در ورودی محفظه احتراق بود که با مقدار محاسبه شده عدد سویرل مطابقت داشت. همچنین به دلیل انبساط ناگهانی دو ناحیه باز چرخشی در مرکز و کنار دیواره محفظه احتراق مشاهده گردید. در بررسی کانتورهای خروجی از حل عددی در خصوص دما، فشار و کسر جرمی گونه‌ها اثر نواحی باز چرخشی و نیز جتهای هوای ورودی از دیواره Flame Tube به داخل محفظه احتراق بر توزیع دما، فشار و کسر جرمی گونه های احتراقی کاملا مشهود بود.

کلمات کلیدی: محفظه احتراق توربین گاز، CFD، مدلسازی احتراق، مدلسازی آشفتگی، مدلسازی انتقال حرارات تشعشع

فهرست مطالب

۱- مقدمه ۲

۱-۱- توصیف مسئله مورد بررسی در تحقیق ۲

۱-۲- معرفی فصل‌های پایان‌نامه ۳

۲- مروری بر کارهای انجام شده ۵

۲-۱- تحلیل عددی میدان جریان و دما در ناحیه رقیق‌سازی یک نمونه محفظه احتراق توربین گاز ۵

۲-۲- تحلیل عددی جریان در محفظه احتراق حلقوی توربین گاز ۶

۲-۳- مدلسازی جریان محترق در یک محفظه احتراق توربین گاز ۷

۲-۴- اثر چرخش هوا بر مشخصه‌های جریان در محفظه احتراق توربین گاز ۹

۲-۵- بررسی ویژگی‌های جریان محترق در محفظه احتراق حلقوی یک توربین گاز ۱۱

۲-۶- مطالعه عددی بر روی یک مشعل دارای سویرل ۱۲

۲-۷- اثر چرخش هوای ورودی روی عملکرد احتراق یک اسپری سوخت مایع در محفظه احتراق توربین گاز ۱۳

۲-۸- اثر تشعشع و مدل‌های تشعشعی در مدلسازی فرآیند احتراق ۱۵

۲-۹- شبیه سازی سه بعدی محفظه احتراق توربین گاز ۱۶

۳- آشنایی با محفظه احتراق توربین گاز ۱۹

۳-۱- انواع محفظه احتراق توربین گاز ۱۹

۳-۱-۱- محفظه لوله‌ای ۱۹

۳-۱-۲- محفظه حلقوی ۲۱

۳-۱-۳- محفظه لوله‌ای- حلقوی ۲۲

۳-۲- اجزاء محفظه احتراق ۲۳

۳-۲-۱- پوسته ۲۳

۳-۲-۲- لاینر ۲۳

۳-۲-۳- دیفیوزر ۲۴

۳-۲-۴- سویرل ۲۵

۳-۳- نواحی مختلف محفظه احتراق ۲۷

۳-۳-۱- ناحیه اولیه ۲۷

۳-۳-۲- ناحیه ثانویه ۲۷

۳-۳-۳- ناحیه رقیق سازی ۲۸

۳-۴- ملزومات محفظه احتراق ۲۹

۳-۵- محفظه احتراق توربین گاز V94.2 ..... ۳۰

۴- شبیه سازی عددی ۳۹

۴-۱- هندسه مدل ۳۹
۴-۲- تولید شبکه محاسباتی ۳۹
۴-۳- مدلسازی عددی ۴۴
۴-۳-۱- معادله پیوستگی و مومنتوم ۴۴
۴-۳-۲- مدلسازی آشفتگی ۴۵
۴-۳-۳- مدلسازی انتقال حرارت ۴۷
۴-۳-۴- مدلسازی تشعشع ۴۹
۴-۳-۵- مدلسازی احتراق ۵۱
۴-۳-۶- شرایط مرزی ۵۳
۴-۳-۷- پارامترهای حل ۵۴
۵- نتایج ۵۶
۵-۱- صحه گذاری بر نتایج ۵۶
۵-۲- میدان جریان ۵۷
۵-۳- محاسبه عدد سویرل ۵۸
۵-۴- میدان دما ۵۸
۵-۵- محاسبه فاکتور الگو ۵۹
۵-۶- میدان فشار ۵۹
۵-۷- میدان کسر جرمی گونه‌های شیمیایی ۵۹
منابع و مراجع ۷۰

فهرست اشکال

شکل ۲-۱- مسیرهای عبور جریان در یک قطاع ۶۰ درجه از ناحیه رقیق‌سازی محفظه احتراق حلقوی ۵
شکل ۲-۲- شبکه محاسباتی به کار رفته برای مدلسازی محفظه احتراق موتور جت ۶
شکل ۲-۳- محفظه احتراق مدل ۹
شکل ۲-۴- هندسه محفظه احتراق حلقوی مدلسازی شده: الف- هندسه سه بعدی، ب- هندسه دو بعدی متقارن محوری ۱۱
شکل ۲-۵- شماتیک محفظه احتراق ۱۴
شکل ۲-۶- هندسه شماتیک دو بعدی مسئله ۱۵
شکل ۲-۷- قسمت ابتدایی محفظه ۱۷
شکل ۳-۱- محفظه احتراق لوله‌ای : الف- تکی، ب- چند تایی ۲۰
شکل ۳-۲- محفظه احتراق حلقوی ۲۱
شکل ۳-۳- محفظه احتراق لوله‌ای- حلقوی ۲۲
شکل ۳-۴- لاینر یک نوع محفظه احتراق لوله‌ای ۲۳
شکل ۳-۵- شماتیکی از سیستم دیفیوزر و جریان در آن ۲۵
شکل ۳-۶- شماتیکی از دو نوع سویرل شعاعی و محوری ۲۶
شکل ۳-۷- نواحی سه گانه عملکرد محفظه احتراق توربین گاز ۲۸
شکل ۳-۸- اجزای محفظه احتراق توربین گاز V94.2 ..... ۳۴
شکل ۳-۹- تصویر نمونه نصب شده توربین گاز V94.2 ..... ۳۵
شکل ۳-۱۰- نمای از بالای محفظه احتراق توربین گاز V94.2 ..... ۳۵
شکل ۳-۱۱- نمای از روبروی محفظه احتراق توربین گاز V94.2 ..... ۳۶
شکل ۳-۱۲- جزئیات مشعل توربین گاز V94.2 ..... ۳۶
شکل ۳-۱۳- تصویر سویرل مورب توربین گاز V94.2 ..... ۳۷
شکل ۳-۱۴- تصویر پره‌های سویرل مورب و نازلهای سوخت رسان در حالت پیش‌مخلوط ۳۷
شکل ۴-۱- هندسه محفظه احتراق توربین گاز V94.2؛ الف- مدل قطاع ۴۵ درجه محفظه احتراق، ب- سویرل ۴۰
شکل ۴-۲- شبکه مدل؛ الف- کل محفظه، ب- مرز بخش گنبدی و محفظه احتراق، پ- پوشش سرامیکی و Flame Tube، ت- بخش گنبدی و محفظه هوا، ث- سویرل، ج- نازلهای سوخت گاز ۴۴
شکل ۴-۳- فرایند انتقال حرارت تشعشعی ۵۰
شکل ۵-۱- توزیع دما در امتداد خط مرکزی عبوری از مرکز سویرل برای شبکه‌های ۱ و ۲ ..... ۶۱
شکل ۵-۲- تاریخچه باقیمانده ها در شبکه ۱ ..... ۶۱
شکل ۵-۳- تاریخچه دمای خروجی، دمای بیشینه محفظه احتراق و Flame Tube در شبکه ۱ ..... ۶۲
شکل ۵-۴- کانتورهای سرعت محوری صفر در صفحه طولی گذرنده از مرکز سویرل ۶۲
شکل ۵-۵- کانتورهای سرعت در صفحه طولی گذرنده از مرکز سویرل(واحد سرعت m/s) ۶۳
شکل ۵-۶- کانتورهای سرعت در صفحه طولی گذرنده از موقعیت زاویه ای ۱۶/۸۷۵ درجه (واحد سرعت m/s) ۶۳
شکل ۵-۷- کانتورهای دما در صفحه طولی گذرنده از مرکز سویرل(واحد دما K) ۶۴
شکل ۵-۸- کانتورهای دما در صفحه طولی گذرنده از موقعیت زاویه ای ۱۶/۸۷۵ درجه (واحد دما K) ۶۴

شکل ۵-۹- کانتورهای فشار کل در صفحه طولی گذرنده از مرکز سویرل(واحد فشار bara)..... ۶۵
شکل ۵-۱۰- کانتورهای فشار استاتیک در صفحه طولی گذرنده از مرکز سویرل(واحد فشار bara)..... ۶۵
شکل ۵-۱۱- کانتورهای کسر جرمی O_2 در صفحه طولی گذرنده از مرکز سویرل..... ۶۶
شکل ۵-۱۲- کانتورهای کسر جرمی O_2 در صفحه طولی گذرنده از موقعیت زاویه ای ۱۶/۸۷۵ درجه..... ۶۶
شکل ۵-۱۳- کانتورهای کسر جرمی CO_2 در صفحه طولی گذرنده از مرکز سویرل..... ۶۷
شکل ۵-۱۴- کانتورهای کسر جرمی CO_2 در صفحه طولی گذرنده از موقعیت زاویه ای ۱۶/۸۷۵ درجه..... ۶۷
شکل ۵-۱۵- کانتورهای کسر جرمی آب در صفحه طولی گذرنده از مرکز سویرل..... ۶۸
شکل ۵-۱۶- کانتورهای کسر جرمی آب در صفحه طولی گذرنده از موقعیت زاویه ای ۱۶/۸۷۵ درجه..... ۶۸
شکل ۵-۱۷- کانتورهای کسر جرمی متان در فضای سویرل..... ۶۹

فهرست جداول

جدول ۲-۱- توزیع هوای ورودی به محفظه اصلی ۱۱
جدول ۳-۱- اندازه و موقعیت سوراخ‌های Flame Tube ۳۲
جدول ۴-۱- نوع و تعداد سلولهای شبکه در نواحی مختلف دامنه حل ۴۱
جدول ۴-۲- شرایط مرزی در ورودی های مسئله ۵۳
جدول ۵-۱- مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی عددی و اطلاعات تجربی ۵۶
جدول ۵-۲- مقایسه نتایج حل عددی حاصل از دو شبکه ۵۷

فصل اول:

مقدمه

۱- مقدمه

محفظه احتراق توربین گاز، یک محفظه احتراق پیچیده است که پدیده‌های زیادی در آن درگیر هستند، از جمله احتراق، آشفتگی، انتقال حرارت (جابجایی، رسانش، تشعشع)، آلاینده‌ها، جریان‌های چندفاز و علم مواد. برای شبیه‌سازی واقعی محفظه احتراق توربین گاز باید پدیده‌های فوق همگی در نظر گرفته شوند. بدیهی است فرایند شبیه‌سازی حاصل تعامل بین دقت و هزینه است. این دو پارامتر در شبیه‌سازی های عددی در مقابل هم قرار دارند. به طوری که برای مدلسازی دقیق یک مسئله لازم است هزینه بیشتری صرف شود.

درسالهای اخیر توجه زیادی به شبیه‌سازی عددی محفظه احتراق توربین گاز شده است. دلیل آن هزینه‌های بالای سعی و خطا در مقیاس واقعی و آزمایشگاهی است. بنابراین روش معقول استفاده از شبیه‌سازی عددی برای بررسی پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد توربین گاز در مرحله اولیه و سپس ساخت یک نمونه منطبق بر مدل عددی و انجام تست‌های لازم روی آن است. مزیت این کار آن است که با صرف زمان اندک می‌توان اثر تغییرات را روی عملکرد توربین گاز بررسی کرده و پس از حصول نتایج مطلوب اقدام به عملیات پرهزینه ساخت نمود.

برای شبیه‌سازی محفظه احتراق توربین گاز لازم است مطالعه مفصلی در مورد پدیده‌های درگیر در محفظه احتراق صورت گیرد. عمده‌ترین پدیده ها عبارتند از آشفتگی، احتراق و انتقال حرارت (رسانش، جابجایی و تشعشع).

۱-۱- توصیف مسئله مورد بررسی در تحقیق

توربین گازی V94.2 زیمنس با توان اسمی ۱۵۹ MW و راندمان ۳۴/۹ ٪ یکی از توربین‌های کلاس سنگین محسوب می‌شود که به طور گسترده ای در نیروگاههای گازی و سیکل ترکیبی کشور جهت به حرکت درآوردن مولدهای نیرو (ژنراتور) مورد استفاده قرار گرفته است. این توربین در ایران توسط شرکت مهندسی و ساخت توربین مپنا (توگا) و تحت لیسانس شرکت Siemens آلمان تولید می‌گردد. سوخت مورد استفاده آن سوختهای مایع (گازوئیل یا سوخت سنگین) و سوختهای گازی با ارزش های حرارتی متنوع و به ویژه گاز طبیعی می باشد.

در این تحقیق شبیه سازی محفظه احتراق توربین گاز V94.2 در وضعیت احتراق پیش مخلوط با سوخت متان صورت گرفته است. هدف از این تحقیق به دست آمدن مدلی است که با آن بتوان اثر پارامترهای مختلف عملکردی از جمله نسبت هوا به سوخت, رطوبت, دما و فشار هوای ورودی و گاز ورودی, جنس مواد و ... را بر روی متغیرهای مهمی از قبیل افت فشار, دما, آلاینده ها و ... در این توربین گازی بررسی کرد.

در ابتدا لازم بود نرم‌افزاری مناسبی برای شبیه‌سازی انتخاب شود؛ با توجه به امکانات موجود در کشور از میان نرم افزارهای موجود، نرم افزار فلوئنت برای این شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. دلایل انتخاب این نرم افزار عبارت بود از:

- توانایی بالای این نرم‌افزار در مدلسازی احتراق، انتقال حرارت و جریان آشفته.
- استفاده از توابع تعریف شده توسط کاربر برای مواردی که شرایط ایجاب می‌کند.
- شبیه‌سازی‌های بیشماری که که در متون علمی با این نرم افزار به انجام رسیده است.

شبیه سازی محفظه احتراق توربین گاز V94.2 تاکنون به صورت آکادمیک انجام نشده است. نتایج این شبیه سازی هر چند برای شرکتی که طراحی این توربین را بر عهده ندارد فایده چندانی نخواهد داشت اما می‌تواند سرآغازی باشد برای طراحی توربین‌های با توان مختلف در شرکتی که صاحب تکنولوژی ساخت توربین است.

۱-۲- معرفی فصل‌های پایان‌نامه

تحقیق حاضر در قالب پنج فصل ارائه می گردد. در فصل دوم کارهای انجام شده در زمینه تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته است. در این فصل نه مورد از تحقیقاتی که شباهت بیشتری با تحقیق حاضر داشته‌اند به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل سوم با عنوان آشنایی با محفظه احتراق توربین گاز, ضمن معرفی انواع مختلف محفظه احتراق توربین-های گازی, اجزای اساسی موجود در این محفظه‌ها به اختصار توضیح داده شده است. آنگاه نواحی مختلف موجود در محفظه احتراق معرفی شده و پس از برشمردن ملزومات یک محفظه احتراق به بررسی محفظه احتراق توربین گاز V94.2 پرداخته شده و نحوه عملکرد این محفظه احتراق و هندسه آن به طور کامل تشریح شده است.

در فصل چهارم نحوه شبیه سازی عددی محفظه احتراق توربین گاز V94.2 به تفصیل ارائه شده است در این فصل پس از معرفی هندسه مدل و نحوه شبکه بندی آن، معادلات حاکم بر مدل به تفکیک مورد بررسی قرار گرفته است. نحوه گسسته‌سازی و حل این معادلات نیز در انتهای این فصل ارائه شده است.

در فصل پنجم, نتایج حاصل از شبیه سازی عددی مدل ارائه شده و مورد تحلیل قرار گرفته است.

فصل دوم:

مروری بر کارهای انجام شده

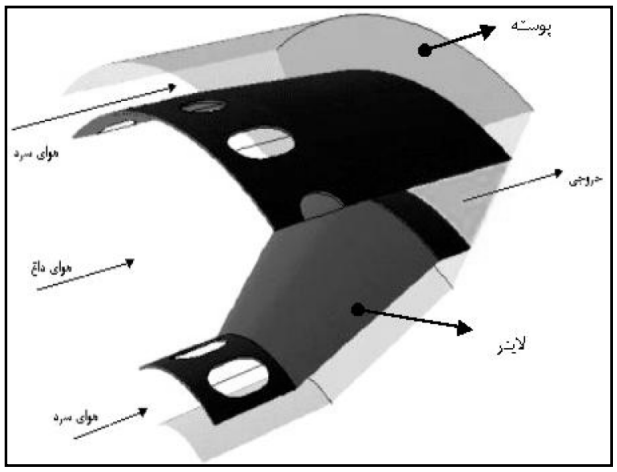
۲- مروری بر کارهای انجام شده

در بررسی متون علمی در زمینه مدلسازی عددی محفظه احتراق توربین گاز عمده کارها معطوف به توربین گازی به کار رفته در هواپیما شده است. در کنار آنها نمونه‌هایی نیز به بررسی توربین‌های گاز صنایع نیروگاهی پرداخته‌اند. نمونه‌هایی از پژوهش‌های انجام شده که بیشترین شباهت را به لحاظ مدلسازی با پژوهش حاضر داشته‌اند در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۱- تحلیل عددی میدان جریان و دما در ناحیه رقیق‌سازی یک نمونه محفظه احتراق توربین گاز

بازدیدی تهرانی و همکاران (۱۳۸۱)، توزیع میدان جریان و دما را در داخل یک قطاع ۱۵ درجه از ناحیه رقیق-سازی یک محفظه احتراق حلقوی توربین گاز در دو حالت جریان هوای داغ و سرد توسط نرم افزار فلوئنت نسخه ۵.۳۳ بررسی کردند و نتایج حل عددی خود را با تحلیل عددی انجام شده توسط مک گوئیرک و پالما (۱۹۹۲) مقایسه نمودند[۱]. و نهایتا ناحیه داغ را در بخش خروجی جریان از محفظه احتراق شناسایی کردند.

هندسه مدل در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.



شکل ۲-۱- مسیرهای عبور جریان در یک قطاع ۶۰ درجه از ناحیه رقیق‌سازی محفظه احتراق حلقوی [۱]

در پژوهش ایشان، برای تحلیل عددی دما ثابت (سرد) روی مدل مورد نظر، معادلات متوسط زمانی مومنتوم و پیوستگی برای جریان دائمی، تراکم ناپذیر و سه بعدی بدون عبارت چشمه در نرم افزار فلوئنت حل شد، و برای تحلیل دمای متغیر، علاوه بر معادلات حاکم ذکر شده، معادله انرژی نیز حل گردید.

در حالت اخیر (تحلیل دما متغیر) معادله حالت برای گاز کامل نیز جزء معادلات مؤثر در تحلیل عددی است. در این تحقیق، جهت مدلسازی جریان آشفته از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ رینولدز بالای استاندارد استفاده شد. با استفاده از نرم افزار گمبیت نسخه ۱.۲.۲ سه سری شبکه با سازمان منطبق بر بدنه با تعداد سلول‌های متفاوت برای مدلسازی جریان سیال ایجاد شد.

جهت بررسی استقلال حل از شبکه پروفیل دما بر روی سه خط واقع بر صفحات جانبی و میانی قطاع ۱۵ درجه، برای سه نوع شبکه استخراج گردید.

در مرزهای ورودی از شرط مرزی سرعت ورودی استفاده شده است. در مرز خروجی، گرادیان‌های تمام متغیرها (به جز فشار) در راستای جریان، صفر فرض شده است. با توجه به هندسه مسئله و تقارن موجود در آن و عدم وجود جریان چرخشی در ورود به لاینر، صفحات جانبی قطاع ۱۵ درجه به عنوان صفحه تقارن فرض شده است. برای مشخص شدن شار حرارتی، تنش برشی و سایر متغیرها در نزدیکی دیواره از قانون دیواره استفاده شد. و دیواره پوسته در بالا و پایین لاینر، آدیاباتیک در نظر گرفته شد.

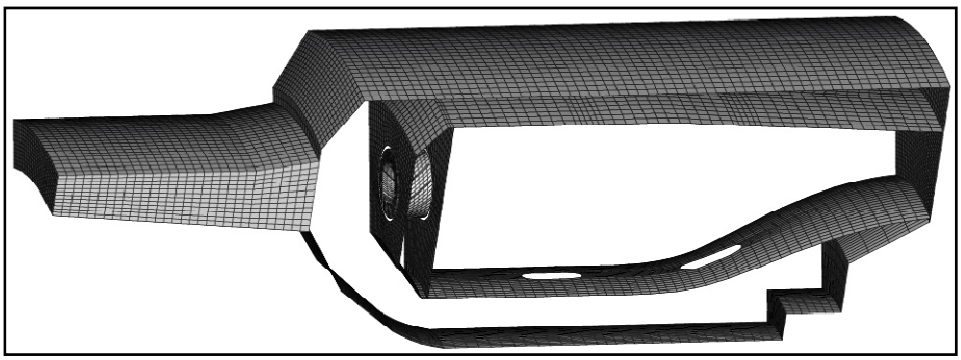
تحلیل عددی با کمک نرم افزار فلوئنت، بر پایه روش حجم محدود سه بعدی در مختصات کارتزین و تحت شرایط دائم انجام شد. برای گسسته‌سازی عبارت جابجایی در معادلات حاکم از طرح قانونی توانی[1] استفاده شد و جهت کوپلینگ سرعت و فشار، الگوریتم SIMPLE به کار گرفته شد. معیار همگرایی تحلیل عددی برای حل معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی جنبشی آشفتگی و استهلاک، 10^{-4} و برای معادله انرژی 10^{-7} در نظر گرفته شد

در این تحقیق احتراق و انتقال حرارت تشعشعی در نظر گرفته نشده است.

۲-۲- تحلیل عددی جریان در محفظه احتراق حلقوی توربین گاز

انصاری، محمدرضا و همکاران (۱۳۸۱) میدان توأم جریان در سیستم محفظه احتراق توربین گاز موتور جت را به طور کامل تحلیل نمودند[۲]. تحقیق ایشان شامل تحلیل عددی جریان در قسمت‌های مختلف محفظه احتراق به صورت مجزا بوده است. ایشان به دلیل نداشتن نتایج تجربی در مورد سیستم کامل محفظه احتراق حلقوی، ابتدا تأثیر متقابل جت‌های روبرو در جریان متقاطع[2] که از جریان‌های مهم محفظه احتراق است را تحلیل نمودند و سپس نتایج حاصل را با نتایج تجربی مقایسه کردند. پس از اطمینان از کسب نتایج صحیح، سیستم محفظه احتراق حلقوی کاربردی را شبیه‌سازی کردند. برای این کار یک قطاع ۳۰ درجه از محفظه احتراق که شامل دیفیوزر، سویرل، لاینر به همراه کانال‌های اطراف است شبیه‌سازی گردید. تحلیل سه بعدی در نرم افزار فلوئنت انجام شد.

مدل هندسی این محفظه احتراق در شکل (۲-۲) نشان داده شده است.



شکل ۲-۲- شبکه محاسباتی به کار رفته برای مدلسازی محفظه احتراق موتور جت [۲]

[1] Power Law

[2] Cross Flow

شبکه مورد استفاده در سیستم کامل محفظه احتراق از نوع با سازمان است. جهت تولید شبکه نرم افزار پیش پردازنده گمبیت استفاده شده است. به دلیل پیچیدگی بسیار زیاد هندسی جهت تولید شبکه با سازمان، هندسه مورد نظر به بخش‌های کوچکتر تقسیم‌بندی شده و شبکه‌بندی گردید. جهت بررسی تأثیر پذیری حل از تعداد سلول‌های شبکه، از چهار نوع شبکه متفاوت استفاده شد. به دلیل تقارن مدل نسبت به محور مرکزی کانال، یک قطاع ۶۰ درجه از کانال در نظر گرفته شد. در طرفین میدان حل یعنی در زوایای ۰ و ۶۰ درجه از شرط مرزی متناوب (پریودیک) استفاده شده است. در نزدیکی محل‌های بحرانی میدان حل بر تراکم شبکه اضافه شده است. مشاهده شد که از ۲۰۰۰۰ سلول به بعد تغییرات معناداری در نتایج به دست نیامد. لذا همان تعداد سلول جهت تحلیل نتایج استفاده گردید.

معادلات بقای جرم و مومنتوم در شرایط دائم، تراکم‌ناپذیر، خواص ثابت و سه بعدی به طور عددی در نرم افزار فلوئنت حل شد. برای مدلسازی آشفتگی از مدل RSM استفاده شد. برای گسسته سازی ترم جابجایی از روش قانون توانی استفاده شد. و برای ایجاد کوپلینگ بین سرعت و فشار، الگوریتم سیمپل به کار گرفته شد. معیار همگرایی برای تمامی معادلات 10^{-4} در نظر گرفته شد.

از ویژگی‌های این تحقیق، استفاده از کمترین تعداد شرط مرزی یعنی فقط در مبادی ورودی و خروجی محفظه احتراق است. شرط مرزی مورد استفاده شامل شرایط جریان در خروجی از کمپرسور و ورودی به توربین است. در ورودی دیفیوزر از شرط مرزی فشار کل و در خروجی از محفظه از شرط دبی جریان استفاده شد

در این تحقیق، معادله انرژی حل نشده است. در نتیجه شبیه‌سازی احتراق و انتقال حرارت تشعشعی نیز مطرح نشده است. ضمن اینکه مشخص نیست که نتایج به دست آمده با چه منبعی اعتبار یافته‌اند.

۲-۳- مدلسازی جریان محترق در یک محفظه احتراق توربین گاز

سردشتی، حمیدرضا (۱۳۸۵) در این تحقیق پدیده احتراق، روش‌های مدلسازی احتراق و آلاینده‌های تولیدی در اثر احتراق را بررسی نموده است[۳]. همچنین میدان جریان محترق درون محفظه احتراق مدلسازی شده و اثر چرخش جریان روی پارامترهای مختلف از جمله میدان سرعت، پروفیل دما و صدور آلاینده‌ها در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

واکنش های شیمیایی به صورت نرخ محدود[1] مدل شده است. با در نظر گرفتن گونه‌های شیمیایی[2] CO_2، CO، NO و ...، جریان‌های محترق در این محفظه حل شد و کانتورهای خواص مختلف (دما، فشار و گونه‌های شیمیایی) استخراج شد. همچنین راندمان احتراق و فاکتور یکنواختی پروفیل دما در محفظه احتراق محاسبه شد. محصولات احتراق در خروجی از محفظه نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش چرخش جریان یکنواختی دما کم می‌شود اما راندمان محفظه بالا می‌رود.

توربین گاز مورد بررسی در تحقیق ، موتور GE/CF M56 بود که دارای محفظه احتراق حلقوی است از یکی از مقالات نشریه ASME انتخاب شده است و با کپی برداری از محفظه احتراق ارائه شده در این مقاله، نتایج به دست آمده از حل عددی مولف با نتایج ارائه شده در مقاله ASME مقایسه شده است.

[1] Finite Rate

[2] Chemical Species