بسم الله الرحمن الرحيم

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

خانم شهیده صیادیان پایان نامه ٦ واحدی خود را **با عنوان شبیه سازی عددی محفظه احتراق توربین گاز زمینی با هدف کاهش آلاینده NOX با روش CLN** در تاریخ ۱۳۹۳/٦/۳۰ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر کیومرث مظاهری	استاد	
استاد ناظر	دکتر هادی پاسدارشهری	استادیار	
استاد ناظر	دکتر امیر مردانی	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر هادی پاسدارشهری	استادیار	

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسان‌ها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می‌باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج □ پایان‌نامه □رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده‌ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده‌ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته‌ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از □ پایان‌نامه □رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

« اینجانب **شهیده صیادیان** دانشجوی دوره کارشناسی‌ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی ورودی سال ۱۳۹۱ متعهد می‌شوم کلِیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه/رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می‌دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

نام و نام خانوادگی: شهیده صیادیان

امضا **تاریخ:** ۱۳۹۳/۱۱/۲۰

آیین نامه چاپ پایان‌نامه رساله‌های دانشجویان دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیت‌های علمی-پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی‌ارشد نگارنده در رشته **مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی** است که در سال ۱۳۹۳ در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر کیومرث مظاهری، دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدییه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

ماده ۶: اینجانب شهیده صیادیان دانشجوی دوره روزانه کارشناسی‌ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام خانوادگی: شهیده صیادیان

امضا

تاریخ: ۱۳۹۳/۱۱/۲۰

دانشکده مهندسی مکانیک-گروه تبدیل انرژی

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک

گرایش تبدیل انرژی

شبیه سازی عددی محفظه احتراق توربین گاز زمینی با هدف کاهش آلاینده NOx به روش CLN

نگارنده:

شهیده صیادیان

استاد راهنما:

دکتر کیومرث مظاهری

شهریور ۱۳۹۳

تقدیم به:

سبزی لبخند مادر

و

آبی نگاه پدر

تشکر و قدردانی:

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی‌مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و حال که با لطف او تدوین این مجموعه به پایان رسیده است جای دارد تا از همه بزرگوارانی که در طی مراحل مختلف این تحقیق یاریم نمودند، قدردانی نمایم.

از خانواده عزیزم به پاس حمایت ها و مهربانی های بی کرانشان که همواره بر زندگی ام سایه افکنده است.

از استاد بزرگوار و گرانقدرم جناب آقای **دکتر کیومرث مظاهری** که بیش ترین نقش را در پیش برد این تحقیق بر عهده داشتند و از راهنمایی های ارزنده و خستگی ناپذیر و حمایت های فراوان ایشان در تمامی مراحل انجام و تدوین این پایان نامه نهایت سپاس را داشته و شادکامی و توفیق روزافزون ایشان و خانواده محترمشان را از صمیم قلب آرزومندم.

از دوستان و همکلاسی های عزیزم بخاطر کمک ها، دلگرمی ها و محبت هایشان در طول انجام این پایان نامه سپاسگزارم و برایشان موفقیت روزن افزون آرزومندم.

چکیده

هدف از کار حاضر شبیه‌سازی محفظه احتراق توربین گاز با هدف کاهش NOx می‌باشد. در روش CLN بخار به صورت پیش‌آمیخته با سوخت به محفظه احتراق تزریق می‌شود. به منظور شبیه سازی از دو روش شبکه راکتوری معادل و شبیه‌سازی CFD استفاده شده است. در روش اول فرآیند احتراق درون یک محفظه آزمایشگاهی به کمک شبکه راکتوری معادل مدل‌سازی شده است. در این مدل‌سازی تأثیر انتقال حرارت از محفظه بر پیش‌بینی فرآیند احتراق منظور شده است. بررسی تأثیر فشار و زمان اقامت بر انتشار اکسید نیتروژن نشان داد افزایش فشار و زمان اقامت به خصوص در دمای بالای شعله سبب افزایش تولید اکسید نیتروژن می‌شود. به طوری که مشاهده می‌شود که میزان انتشار اکسید نیتروژن با توان متغیری از فشار در ارتباط است که این توان، خود تابعی از دماست. همچنین با تزریق بخار به درون محفظه احتراق مدل شده به کمک شبکه راکتوری معادل، می‌توان کاهش آلاینده اکسید نیتروژن را در مقایسه با حالت بدون تزریق مشاهده کرد. در روش دوم، شبیه سازی CFD برای یک محفظه احتراق غیرپیش‌آمیخته به صورت متقارن محوری انجام شده است. در این شبیه‌سازی، در ابتدا تأثیر مدل‌های احتراق مختلف بر پیش‌بینی دما و میزان تولید NOx بررسی گردید. بر این اساس مدل EDC با توجه به این که قابلیت اعمال سینتیک‌های مختلف را دارد، برای پیش‌بینی NOx مدل مناسب‌تری است. همچنین تأثیر تزریق بخار به داخل محفظه به صورت پیش‌آمیخته با سوخت بررسی و نتایج آن با حالت بدون تزریق بخار به داخل محفظه و حالت تزریق بخار به صورت پیش‌آمیخته با هوا مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که تزریق بخار پیش‌آمیخته با سوخت، سبب کاهش بیشتر NOx نسبت به حالت تزریق بخار پیش‌آمیخته با هوا شده، و با جلوگیری از افزایش میزان تولید CO سبب بهبود کارایی احتراق می‌شود.

کلمات کلیدی: محفظه احتراق توربین گاز، شبیه‌سازی عددی، شبکه راکتوری معادل، کاهش NOx، تزریق بخار

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه **۱**

۱-۱- پیشگفتار ۱

۱-۲- معرفی محفظه احتراق توربین گاز و قسمت های مختلف آن ۱

۱-۳- مروری بر تحقیقات انجام شده ۳

۱-۴- اهداف و ساختار تحقیق حاضر ۱۰

فصل ۲: معادلات حاکم و روش عددی **۱۲**

۲-۱- مقدمه ۱۲

۲-۲- مدلسازی محفظه احتراق به کمک شبکه راکتوری معادل ۱۲

۲-۲-۱- مدلهای راکتوری پایه ۱۳

۲-۲-۱-۱ راکتور اختلاط ایده آل ۱۳

۲-۲-۱-۲ راکتور پیستونی ۱۵

۲-۳- شبیه سازی CFD محفظه احتراق ۱۷

۲-۳-۱- معادلات حاکم ۱۷

۲-۳-۱-۱ مدل اغتشاشی ۲۰

۲-۳-۱-۲ مدل احتراقی ۲۲

۲-۳-۱-۳- مدل تشعشع ۲۸

۲-۳-۱-۴ شرایط مرزی ۳۰

۲-۳-۱-۵ روش حل عددی ۳۱

۲-۴- جمع‌بندی ۳۱

فصل ۳: نتایج و بحث **۳۳**

۳-۱- مقدمه ۳۳

۳-۲- تحلیل محفظه احتراق با استفاده از مدل شبکه راکتوری معادل ۳۳

۳-۲-۲- مدل شبکه راکتوری مناسب محفظه ۳۵

۳-۲-۳- بررسی اثر مدل انتقال حرارت بر پیشبینی دقیق آلایندهها ۳۷

۳-۲-۴- بررسی تأثیر فشار، زمان اقامت ۳۹

۳-۲-۵- بررسی اثر تزریق بخار به داخل محفظه ۴۱

۳-۳- تحلیل محفظه احتراق با استفاده از CFD ۴۳

۳-۳-۲- شبیه‌سازی عددی ۴۴

۳-۳-۳- بررسی مدلهای احتراقی ۴۹

۳-۳-۴- تزریق بخار ۵۲

۳-۴- جمع‌بندی ۶۰

فصل ۴: جمع‌بندی و پیشنهادات **۶۲**
۴-۱- جمع‌بندی نهایی ۶۲
۴-۲- پیشنهادات جهت تکمیل و ادامه کار ۶۴

مراجع ۶۶

فهرست علائم و نشانه‌ها

A	مساحت، m^2
A_k	ضریب دما در معادله آرنیوس
a_g	ضریب جذب سیال
a_p	ضریب جذب ذرات
C_{EBV}	ثابت مدل اتلاف گردابه
C_p	ظرفیت گرمای ویژه، $J/kg\,K$
C_τ	ثابت مقیاس زمانی
C_ξ	ثابت کسر حجمی
D	قطر محفظه احتراق، m
D_k	ضریب نفوذ گونه kام، m^2/s
d_0	قطر جت، m
E_k	انرژی فعال‌سازی واکنش، J
f	کسر مخلوط
h_{in}	ضریب انتقال حرارت داخلی، W/m^2K
h_{out}	ضریب انتقال حرارت خارجی، W/m^2K
h_r	ضریب انتقال حرارت تشعشعی، W/m^2K
I	شدت تشعشع،
k	انرژی جنبشی توربولانسی،
l	طول محفظه احتراق، m
M	جرم مولکولی، kg/mol
m_{CV}	جرم درون حجم کنترل، kg
m_0	دبی جرمی جت، kg/s
$\dot{m}_{i,in}$	دبی جرمی ورودی گونه iام، kg/s
$\dot{m}_{i,out}$	دبی جرمی خروجی گونه iام، kg/s
P	فشار، Pa
Pr_t	عدد پرانتل توربولانسی
$\dot{Q}$	نرخ انتقال حرارت، W
R	ثابت جهانی گازها
r	بردار مکانی، m
S	نسبت بخار به سوخت

S_L	سرعت سوزش آرام، m/s
$\mathrm{Sc_t}$	عدد اشمیت توربولانسی
T	دما، K
T_0	دمای داخل راکتور، K
u	سرعت، m/s
t	ضخامت محفظه احتراق، m
t_{res}	زمان اقامت گاز، s
V	حجم محفظه احتراق، m^3
x	مختصه طولی، m
Y	کسر جرمی

علائم یونانی

β	توان دما در معادله آرنیوس
ρ	چگالی، kg/m^3
ρ_0	چگالی جت، kg/m^3
ρ_1	چگالی سیال اطراف جت، kg/m^3
ρ_u	چگالی گازهای نسوخته، kg/m^3
$\overline{\rho}$	متوسط زمانی چگالی، kg/m^3
σ_{sp}	ضریب پخش ذرات
μ_t	لزجت توربولانسی، Pa.s
ε	نرخ اتلاف اغتشاشی،
τ	مقیاس زمانی آشفتگی، s
τ^*	مقیاس زمانی واکنش گونه‌ها، s
ν	لزجت سینماتیکی، m^2/s
$\overline{\dot{\omega}}_k$	نرخ تولید گونه kام،
$\overline{\dot{\omega}}_T$	نرخ حرارت آزاد شده ناشی از احتراق،
$\overline{\omega}_p$	نرخ کسر جرمی متوسط محصولات واکنش،
$\overline{\omega}_F$	نرخ کسر جرمی متوسط سوخت،
$\overline{\omega}_{O_2}$	نرخ کسر جرمی متوسط اکسیدکننده،
Ω'	زاویه فضایی،
ξ^*	کسر حجمی گردابه‌های ریزمقیاس

زیرنویس‌ها

حجم کنترل	*CV*
سوخت	*F*
گونه iام	*i*
ورودی	*in*
مخلوط	*mix*
خروجی	*out*
محصولات واکنش	*p*
اختلاط ایده‌آل	*PFR*
اختلاط پیستونی	*PSR*
تشعشعی	*r*
اقامت	*res*
توربولانسی	*t*
مجموع	*Total*

فهرست اشکال

شکل (۱-۱) محفظه احتراق توربین گاز و قسمت‌های مختلف آن ۲
شکل (۲-۱) راکتور اختلاط ایده آل ۱۴
شکل (۲-۲) راکتور پیستونی ۱۵
شکل (۲-۳) حجم کنترل شارهای جرمی، مومنتوم، انرژی و گونه ها برای راکتور پیستونی ۱۶
شکل (۲-۴) توصیف گرافیکی تابع احتمال جرم‌مخصوص ۲۶
شکل (۳-۱) محفظه احتراق آزمایشگاهی مورد مطالعه ۳۴
شکل (۳-۲) شبکه راکتوری برای مدلسازی محفظه احتراق ۳۵
شکل (۳-۳) مدل انتقال حرارت از محفظه احتراق ۳۷
شکل (۳-۴) تغییرات اکسید نیتروژن با دما بدون در نظر گرفتن اتلاف حرارت ۳۸
شکل (۳-۵) تغییرات تولید اکسید نیتروژن با دما ۳۹
شکل (۳-۶) تغییرات تولید اکسید نیتروژن با دما در فشارهای متفاوت ۴۰
شکل (۳-۷) تغییرات تولید اکسید نیتروژن در زمان اقامت‌های مختلف ۴۱
شکل (۳-۸) تأثیر تزریق بخار بر تولید آلاینده اکسید نیتروژن ۴۲
شکل (۳-۹) تأثیر نسبت بخار به سوخت در میزان تولید اکسید نیتروژن ۴۲
شکل (۳-۱۰) طرحواره محفظه احتراق مورد مطالعه ۴۳
شکل (۳-۱۱) نمودار دما در محور محفظه به منظور بررسی عدم وابستگی حل به تعداد سلول محاسباتی ۴۵
شکل (۳-۱۲) مقایسه دما در محور محفظه احتراق با نتایج تجربی و حل عددی ۴۶
شکل (۳-۱۳) کسرجرمی متان (بالا) و اکسیژن (پایین) در محور محفظه احتراق ۴۷
شکل (۳-۱۴) کسرجرمی متان (بالا) و اکسیژن (پایین) در محور محفظه احتراق ۴۸
شکل (۳-۱۵) مقایسه کسر مولی NO پیش بینی شده به روش عددی با داده های تجربی ۴۹
شکل (۳-۱۶) نمودار دما در محور مرکزی محفظه برای مدل‌های احتراقی مختلف ۵۱
شکل (۳-۱۷) نمودار کسر مولی NO در محور مرکزی محفظه برای مدل‌های احتراقی مختلف.. ۵۱
شکل (۳-۱۸) محدود شدن منطقه احتراقی در اثر پیش آمیختن بخار با سوخت ۵۳
شکل (۳-۱۹) مقایسه تغییرات تولید NOx و CO در اثر تزریق آب از طریق هوا، تزریق آب از طریق سوخت و تزریق آب به صورت جداگانه در کار تجربی گریوز و همکاران ۵۴
شکل (۳-۲۰) کانتور کسر مخلوط در محفظه احتراق برای سه حالت بدون تزریق بخار، تزریق بخار پیش‌آمیخته با هوا و تزریق بخار پیش آمیخته با سوخت ۵۶
شکل (۳-۲۱) کانتور دما در محفظه احتراق برای سه حالت بدون تزریق بخار، تزریق بخار پیش‌آمیخته با هوا و تزریق بخار پیش آمیخته با سوخت ۵۷

شکل (۳-۲۲) کانتور کسر مولی NO در محفظه احتراق برای سه حالت بدون تزریق بخار، تزریق بخار پیش‌آمیخته با هوا و تزریق بخار پیش آمیخته با سوخت ۵۸
شکل (۳-۲۳) کانتور کسر مولی CO در محفظه احتراق برای سه حالت بدون تزریق بخار، تزریق بخار پیش‌آمیخته با هوا و تزریق بخار پیش آمیخته با سوخت ۵۹
شکل (۳-۲۴) کسر جرمی بخار آب روی شعاع محفظه در فاصله ۰/۳۱۲ متری از ابتدا برای سه حالت بدون تزریق بخار، تزریق بخار پیش‌آمیخته با هوا و تزریق بخار پیش آمیخته با سوخت..... ۶۰

فهرست جداول

جدول (۲-۱) ثابت‌های معادلات انرژی جنبشی اغتشاشی و نرخ اتلاف اغتشاشی ۲۲
جدول (۳-۱) پارامترهای اولیه برای محاسبات مدل سینتیکی آلاینده‌ها ۳۵
جدول (۳-۲) شرایط عملکرد محفظه احتراق ۵۰
جدول (۳-۳) ثوابت آرنیوسی سینتیک دومرحله‌ای متان ۵۳
جدول (۳-۴) دما، کسر مولی اکسیدنیتروژن و کسرمولی کربن مونوکسید در گازهای خروجی... ۵۹

فصل ۱: مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

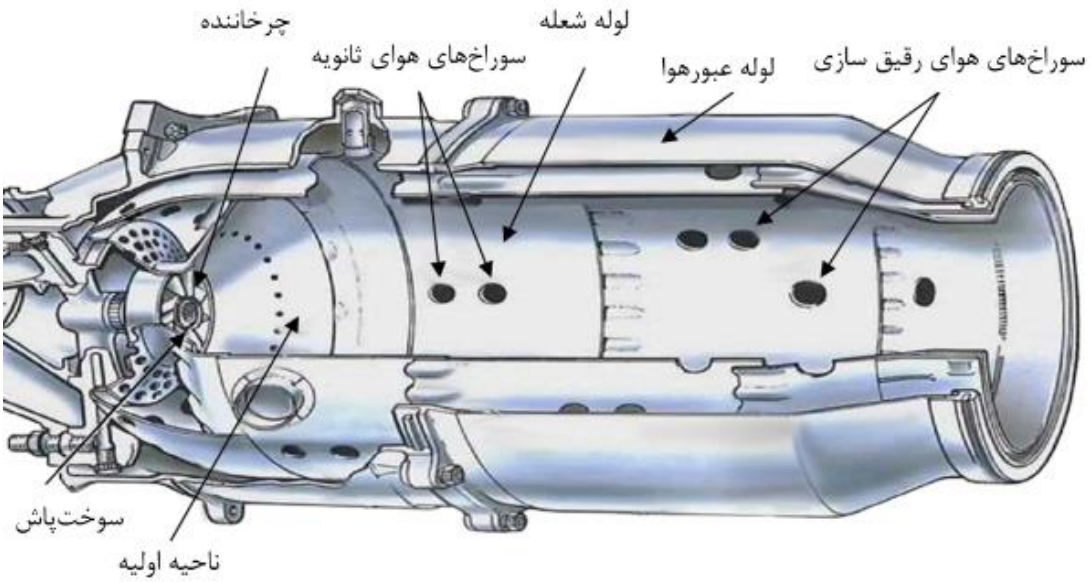
در این فصل به مرور ادبیات شبیه‌سازی محفظه احتراق توربین‌های گازی به روش‌های مختلف پرداخته شده است. در این راستا، در ابتدا قسمت‌های مختلف محفظه احتراق به اختصار معرفی می‌شود. سپس با توجه به اهمیت کاهش آلاینده‌های NOx و شبیه‌سازی محفظه احتراق، به ارزیابی ادبیات مدل‌سازی محفظه احتراق به روش‌های مختلف و با هدف کاهش آلاینده NOx پرداخته می‌شود. در انتها نیز اهداف اصلی کار حاضر بیان می‌شود.

۱-۲- معرفی محفظه احتراق توربین گاز و قسمت های مختلف آن

شکل (۱-۱) اجزای اصلی محفظه احتراق یک توربین گاز را نشان می‌دهد. به طور کلی ساختمان محفظه احتراق از دو لایه تشکیل می‌شود؛ لایه داخلی که به آن لوله شعله[۱] یا لاینر[۲] گفته می‌شود. و لایه بیرونی که پوشش محفظه احتراق است و به عنوان لوله عبور هوا[۳] شناخته می‌شود. مشعل و سوخت‌پاش‌ها در ابتدای محفظه قرار داشته و فرآیند احتراق درون لاینر انجام می‌شود. هوای خروجی از کمپرسور در مراحل مختلفی به داخل محفظه تزریق می‌شود. قسمتی از این هوا از طریق سوراخ‌های نزدیک مشعل و سوخت‌پاش‌ها وارد محفظه شده و صرف فرآیند احتراق می‌شود. این هوا که به هوای اولیه[۴] موسوم است، معمولاً پس از عبور از یک سری چرخاننده[۵] به محفظه وارد می‌شود. حرکت چرخشی تولید شده توسط چرخاننده‌ها سبب اختلاط بهتر سوخت و هوا شده و فرآیند احتراق را بهبود می‌بخشد. هوای ثانویه[۶] از طریق حفره‌هایی که روی بدنه لاینر قرار دارد،

[1] Flame tube
[2] Liner
[3] Air casing
[4] Primary air
[5] Swirl
[6] Secondary air

از لوله عبور هوا به داخل محفظه وارد شده و به تکمیل فرآیند احتراق کمک می‌کند. در قسمت انتهایی لاینر محفظه‌های احتراق نیز، سوراخ‌هایی برای ورود هوا به محفظه وجود دارد، که به این هوا، هوای رقیق‌سازی[1] گفته می‌شود. محصولات احتراق توسط این هوا رقیق شده و تا دمای مورد نیاز ورودی توربین خنک می‌شود [1].



شکل (۱-۱) محفظه احتراق توربین گاز و قسمت های مختلف آن

اکسیدهای نیتروژن و کربن مونوکسید، اصلی‌ترین آلاینده‌های توربین گاز است. کربن مونوکسید در اثر احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی، و اکسیدهای نیتروژن به طور عمده در اثر شکستن پیوندهای نیتروژنی هوا در دمای بالای ناشی از فرآیند احتراق تولید می‌شود. اکسیدهای نیتروژن گستره وسیعی از ترکیبات نیتروژن‌دار است، که اثرات زیان‌باری بر سلامت انسان و محیط زیست بر جای می‌گذارد. اکسیدهای نیتروژن در فرآیند احتراق توربین‌های گازی، بیشتر به صورت مونوکسید نیتروژن تولید می‌شود. به طور کلی ازدیاد انتشار اکسیدهای نیتروژن، نسبت مستقیم با ازدیاد دمای محفظه احتراق دارد [2].

[1] Dilution air

به دلیل کاهش محدوده مجاز تولید آلاینده‌ها توسط آژانس‌های محیط زیست، تلاش‌های زیادی در جهت کاهش تولید این آلاینده‌ها برای محفظه‌های موجود، و طراحی محفظه‌های احتراق جدید با کمترین میزان تولید آلاینده، به صورت صنعتی و تحقیقاتی انجام گرفته است. داشتن درک مناسبی از فرآیند احتراق درون محفظه و مطالعه پارامترهای مؤثر بر تولید آلاینده‌های آن، برای دستیابی به یک محفظه احتراق با کمترین میزان تولید آلاینده‌ها ضروری است. هدف کلی تحقیق حاضر شبیه‌سازی عددی محفظه احتراق توربین گاز صنعتی با هدف کاهش اکسیدهای نیتروژن به روش CLN[1] است. در این روش با تزریق بخار به شعله غیرپیش‌آمیخته، از تولید بیش از اندازه NOx در محفظه احتراق جلوگیری می‌شود.

۱-۳- مروری بر تحقیقات انجام شده

از آنجایی که اکسیدهای نیتروژن جزو گونه‌های میانی واکنش سوخت و هوا درون محفظه احتراق بوده و پارامترهای زیادی ازجمله زمان اقامت، دما، فشار و سینتیک واکنش بر تولید گونه‌های NOx مؤثر است، پیش‌بینی مقدار تولید این آلاینده، در محفظه احتراق بسیار دشوار می‌باشد. بنابراین علاوه بر تلاش در جهت استفاده از روش‌های مناسب برای کاهش تولید این آلاینده‌ها، بخش زیادی از مطالعات انجام شده در زمینه آلاینده‌های توربین گاز، بر روش‌های پیش‌بینی مناسب این آلاینده‌ها متمرکز بوده است.

روش‌های زیادی برای پیش‌بینی آلاینده‌های توربین گاز وجود دارد، که می‌توان آن‌ها را در چهار گروه روش‌های تحلیلی، روش‌های نیمه‌تجربی، روش‌های شبکه راکتوری معادل[2] و روش‌های شبیه‌سازی عددی دسته‌بندی کرد، که از بین آن‌ها، روش‌های تحلیلی و شبکه راکتوری معادل، شیوه‌های ساده‌تری برای پیش‌بینی آلاینده‌هاست. در روش شبکه راکتوری، سینتیک کامل واکنش احتراق، با فیزیک مسئله کوپل می‌شود. شبیه‌سازی عددی نیازمند اطلاعات دقیق از هندسه محفظه احتراق بوده و هزینه‌های محاسباتی زیادی به دنبال خواهد داشت. روش نیمه‌تجربی نیز مستلزم داشتن اطلاعاتی از پارامترهای احتراقی مانند زمان خاموشی، دما و برخی پارامترهای احتراقی است که دستیابی به چنین اطلاعاتی ساده نیست. البته برای انتخاب روش مناسب برای

---

1 Cheng Low NOx

2 Equivalent Reactor Network

پیش‌بینی آلاینده‌ها، باید در نظر داشت که روش مورد نظر، ارتباط مناسبی بین شرایط عملکرد محفظه و پارامترهای طراحی آن با انتشار آلاینده‌ها ایجاد کرده و از پارامترهای مناسبی برای پیش‌بینی آلاینده‌ها استفاده کند، مثلا استفاده از نسبت هم‌ارزی، دما و فشار در محفظه احتراق مناسب‌تر از جزئیات مربوط به جریان برگشتی است.

بنابراین در قسمتی از مرور ادبیات آلاینده‌های محفظه احتراق، به بررسی مطالعات انجام شده در زمینه پیش‌بینی آلاینده‌های احتراقی توربین گاز به روش‌های مختلف پرداخته شده و در قسمت دیگر به مرور ادبیات کاهش آلاینده‌ها به روش تزریق آب یا بخار پرداخته می‌شود.

اولین بار ایده تزریق بخار به سیکل توربین گاز در سال ۱۹۰۳ مطرح شد [3]. هدف اصلی در تزریق بخار به سیکل توربین گاز، در ابتدا افزایش توان خروجی، با افزایش دبی جرمی سیکل بود. اما با توجه به تحقیقات انجام شده در این زمینه، مشاهده شد که تزریق بخار با کاهش دمای محفظه احتراق، سبب کاهش اکسیدهای نیتروژن تولید شده در توربین گاز نیز می‌گردد [4].

از آنجایی که تولید NOx به طور نمایی به دما بستگی دارد، یک راه ساده برای کاهش آن، کاهش دمای منطقه احتراقی است. افزودن هوای اضافه، روش مؤثری برای کاهش NOx می‌باشد[2]. ولی به دلیل افزایش سرعت جریان در ناحیه اولیه و تأثیر بر پایداری شعله، زیاد مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. یک روش جایگزین، ایجاد چاه حرارتی مانند آب یا بخار در منطقه احتراقی است. واضح است که استفاده از این روش، به‌دلیل محدودیت در افزایش وزن، برای موتورهای هوایی مناسب نیست، اما در عمل به‌دلیل در دسترس بودن مقدار زیاد آب یا بخار گزینه مناسبی برای موتورهای بزرگ زمینی است. این روش تاکنون به طور گسترده برای کاهش NOx تا سطح تعیین شده توسط EPA[1] به کار رفته است.

پیشینه تحقیقات انجام شده در زمینه احتراق توربین‌های گازی به اندازه پیشینه توربین‌های گازی بوده و امکان بررسی حجم وسیعی از مطالعات اولیه انجام شده در این زمینه وجود ندارد و در این قسمت فقط به مرور ادبیات برخی از کارهای مهم پرداخته می‌شود.

1 Environmental Protection Agency