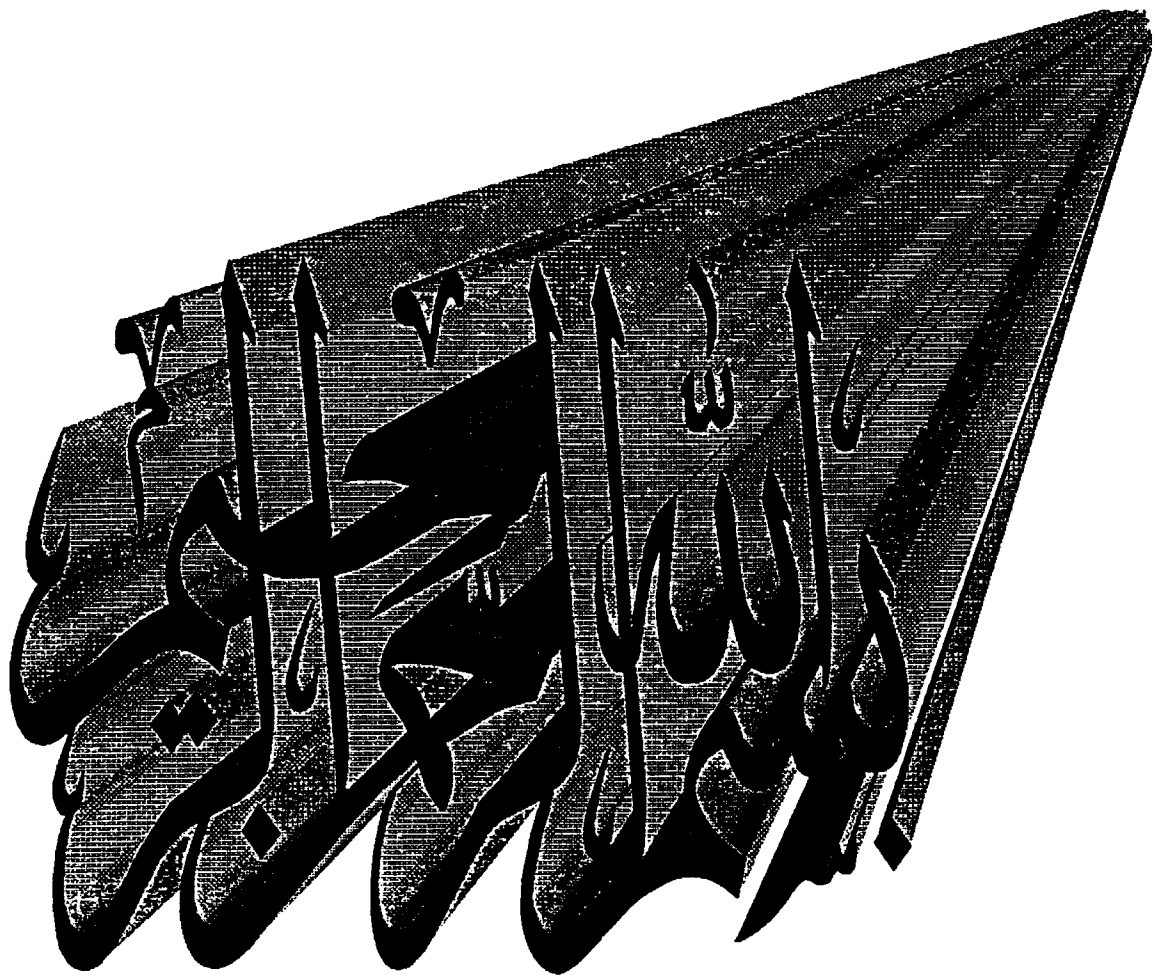

٢٧٩٩٧

مرکز اطلاعات مدارک علمی ایران
۱۳۷۸ /۱۱/ ۱۱

دانشگاه علم و صنعت ایران
دانشکدهٔ مکانیک

# بررسی فرآیند احتراق در بویلرهای نیروگاهی

۱۴۸۷۷

همایون فیض

**پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد**
**در رشتهٔ مهندسی مکانیک**

استاد راهنما : دکتر سیدمصطفی حسینعلی‌پور

پائیز ۱۳۷۸

۲۷۶۹۷

تقـــــدیم به

پـــدر و مادر

بـــزرگـــوارم

## چکیده

با توجه به قیمت روز افزون سوخت‌های فسیلی و همچنین آلودگی محیط زیست بهبود مسألهٔ احتراق سوخت در نیروگاه‌ها اهمیت خاصی دارد تا علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف، آلودگی ناشی از آلاینده‌های مختلف نظیر اکسیدهای نیتروژن و مونواکسیدکربن کاهش یابد.

احتراق کامل در بویلرهای نیروگاهی با استفاده از هوای تئوری (استوکیومتری) حاصل نمی‌شود و معمولاً مقداری مونواکسیدکربن در محصولات احتراق دیده می‌شود. با زیادکردن هوای ورودی یعنی دمیدن هوای اضافی، غلظت مونواکسیدکربن کاهش می‌یابد اما از طرفی این عمل سبب کاهش راندمان احتراق می‌شود زیرا بخش قابل ملاحظه‌ای از انرژی حاصل از احتراق صرف گرم کردن هوای احتراق می‌گردد که همراه محصولات احتراق از دودکش خارج می‌شود.

در بارهای مختلف مقدار بهینهٔ درصد هوای اضافی متغیر بوده و در هر نیروگاهی بسته به نوع مشعل‌ها، کیفیت اختلاط هوا با سوخت متفاوت است و بصورت تجربی در هر نیروگاهی بدست می‌آید. اما با توجه به رفتار گذرای سیستم لازم است که یک سیستم کنترل احتراق تعبیه شود. ایجاد این سیستم کنترل خودکار احتراق مستلزم مدلسازی سیستم در حالت دینامیکی و در نهایت یافتن تابع تبدیل کلی با ورودی میزان دبی هوا و خروجی مقدار اکسیژن حس شده در سنسور می‌باشد.

در این پایان‌نامه یک مدل دینامیکی از احتراق برای یافتن پاسخ سیستم (میزان محصولات احتراق) در زمان‌های مختلف بازای تغییر زاویهٔ دمپر هوا (یا دبی حجمی هوا) بدست می‌آید که پس از اصلاح این مدل توسط ضرایبی که از نمونهٔ واقعی بدست می‌آید می‌توان یک سیستم کنترل کننده روی آن پیاده سازی نمود.

**در کویری روحمان تسخیر شد**
**آب عشق از خاکمان تبخیر شد**
ر.واعظ شهرستانی

**تقدیر و تشکر:**

ضمن سپاس بیکران خداوند، بر خود لازم می‌دانم از گروه مکانیک پژوهشگاه نیرو که امکانات پژوهشی جهت انجام یک پروژهٔ کاربردی را در اختیار اینجانب قرار داده تشکر نمایم. ضمناً از استاد محترم جناب آقای دکتر سیدمصطفی‌حسینعلی‌پور که با ارائه راهنمایی‌های مدبرانه و دلسوزانه خود، نظارت و سرپرستی این پروژه را به عهده داشتند، صمیمانه قدردانی می‌نمایم. همچنین از اعضای هیات داوری بخاطر حضور در جلسهٔ دفاعیه و فراهم نمودن امکان ارائه پربار آن، صمیمانه تشکر نموده و سپاس خود را به حضورشان تقدیم می‌دارم. از همکاری آقای مهندس شهام افشارکرمانشاهی کمال تشکر را دارم.

مهر ۱۳۷۸

## فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


فصل اول : تعریف و اهداف پروژه ..... ۱

۱-۱ مقدمه ..... ۱

۱-۲ مرور ادبیات ..... ۲

۱-۳ بهینه سازی احتراق ..... ۳

۱-۳-۱ کنترل نسبت سوخت به هوا ..... ۳

۱-۳-۱ -۱ عوامل موثر بر بازده احتراق ..... ۳

۱-۳-۱-۲ روشهای کنترل نسبت سوخت به هوا ..... ٤

۱-۳-۱-۳ سیستم کنترل ایده‌آل ..... ۷

۱-۳-۲ کنترل دمای گازهای احتراق ..... ۹

۱-۳-۲-۱ انتشار تری اکسید سولفور و تأثیر آن بر روی دمای نقطهٔ شبنم ..... ۹

۱-۳-۲-۲ اندازه‌گیری و محدودیت‌های دمای نقطهٔ شبنم ..... ۹

۱-٤ بررسی مسیر سوخت و هوا در بویلر ..... ۱٤

۱-٤-۱ مقدمه ..... ۱٤

۱-٤-۲ سیستم آب - بخار ..... ۱٤

۱-٤-۳ سیستم هوای احتراق بویلر ..... ۲۲

۱-٤-۳-۳ جریان طبیعی و اجباری ..... ۲۲

۱-٤-۳-۳ بویلرهای تحت فشار ..... ۲٤

۱-٤-۳-۳ بویلرهای تحت خلاء ..... ۲٤

۱-٤-۳-٤ دریچه‌های تنظیم هوا ( دمپر ) ..... ۲۷

۱-٤-۳-۵ فن‌های دورمتغیر ..... ۳۱

۱-٤-٤ مشعل‌ها ..... ۳۳

۱-٤-٤-۱ انواع سوخت‌های مصرفی ..... ۳۳

۱-٤-٤-۲ مشعل‌های گازی ..... ۳۸

۱-٤-٤-۳ مشعل‌های سوخت مایع ..... ٤۰

فصل دوم: مدلسازی احتراق در حالت استاتیکی ..... ٤۷

مقدمه ..... ٤۷

۲-۱ احتراق استوکیومتری ..... ٤۷

۲-۱-۱ آنتالپی مطلق و آنتالپی تشکیل ..... ٤۸

۲-۱-۲ آنتالپی احتراق و وارزش های حرارتی ..... ٤۹

۲-۱-۳ درجه حرارت آدیاباتیک شعله ..... ۵۱

| عنوان | صفحه |
|---|---|


۲-۲ احتراق استوکیومتری در انواع سوختها ..... ۵۳
۲-۲-۱ اوزان اتمی وترکیب سوخت وهوا ..... ۵۳
۲-۲-۲ محاسبهٔ نسبت سوخت به هوا استوکیومتری برای هیدروکربنها ..... ۵۳
۲-۲-۳ محاسبهٔ نسبت سوخت به هوا برای سوختهای اکسیژنه ..... ۵۵
۲-۲-٤ محاسبهٔ نسبت هوا به سوخت استوکیومتری برای سوختهای سولفور دار ..... ۵٦
۲-۲-۵ محاسبهٔ نسبتهای هوا به سوخت استوکیومتری برای سوختهای نیتروژن دار ..... ۵٦
۲-۲-٦ محاسبهٔ نسبتهای هوا به سوخت استوکیومتری برای سوختهای شامل آب ..... ۵۷
۲-۲-۷ سوختهای بدون اتم کربن ..... ۵۷
۲-۲-۸ تأثیر رطوبت هوا ..... ۵۷
۲-۳ تعادل شیمیائی ..... ۵۸
۲-۳-۱ محدودهٔ تعادل شیمیائی ..... ۵۸
۲-۳-۲ ثابت تعادلی برای مخلوطهای گاز ایده‌آل ..... ٦۱
۲-٤ احتراق غیر استوکیومتری ..... ٦۳
۲-٤-۱ معادلهٔ احتراق ..... ٦۳
۲-٤-۲ روش حل معادلات ..... ٦٦

فصل سوم : بررسی فرآیند احتراق در حالت گذرا ..... ٦۹
مقدمه ..... ٦۹
۳-۱ موتور پله ای ..... ۷۰
۳-۲ دمپر هوا ..... ۷۰
۳-۳ محفظهٔ احتراق ..... ۷۲
۳-۳-۱ مدل ریاضی احتراق ..... ۷۲
۳-۳-۲ موازنهٔ دی اکسید کربن ..... ۷٦
۳-۳-۳ موازنهٔ مونواکسید کربن ..... ۷۷
۳-۳-٤ موازنهٔ نیتروژن ..... ۷۸
۳-۳-۵ موازنهٔ دی‌اکسید گوگرد ..... ۷۸
۳-۳-٦ موازنهٔ آب ..... ۷۹
۳-٤ کانال گازهای احتراق ..... ۸۲
۳-۵ محفظهٔ جمع کننده ..... ۸۲
۳-٦ سنسور اکسیژن ..... ۸۲
۳-۷ تابع تبدیل کلی سیستم ..... ۸٤

**عنوان** **صفحه**


فصل چهارم : الگوریتم‌ها و برنامه‌های کامپیوتری ..... ۸۵

٤-۱ مقدمه ..... ۸۵

٤-۲ الگوریتم برنامهٔ *ProdResp1.m* ..... ۸۷

٤-۳ الگوریتم برنامهٔ *ProdResp2.m* ..... ۸۸

٤-٤ نتایج ..... ۹۱

٤-٥ مقایسهٔ نتایج و صحت آنها ..... ۱۰۱

٤-٦ نتیجه‌گیری ..... ۱۰٤

٤-۷ پیشنهادات ..... ۱۰٤

ضمیمهٔ الف - محاسبهٔ حجم محصولات احتراق، دما و بازده احتراق در حالت استوکیومتری وغیراستوکیومتری ... ۱۰٦

ضمیمهٔ ب - محاسبهٔ دمای آدیاباتیک شعله ..... ۱۱۰

ضمیمهٔ ج- روش نیوتن رافسون اصلاح شده ..... ۱۱۱

فهرست مراجع ..... ۱۱۲

## فهرست تصاویر

| شکل | عنوان | صفحه |
|---|---|---|

فصل اول:


۱-۱ تغییرات اتلاف انرژی، میزان مونواکسیدکربن و اکسیژن نسبت به هوای اضافی ..... ۵
۱-۲ تأثیر احتراق در حالت واقعی و تغییر نمودار تئوری اتلاف انرژی ..... ٦
۱-۳ دستگاه اندازه‌گیر مونواکسیدکربن ..... ۸
۱-٤ تغییرات دمای گازهای خروجی بر حسب غلظت تری‌اکسیدگوگرد در محصولات ..... ۱۰
۱-۵ شماتیک دستگاه اندازه‌گیر نقطهٔ شبنم ..... ۱۱
۱-٦ تغییرات دمای نقطهٔ شبنم بر حسب هوای اضافی در سوخت‌ها با درصد گوگرد مختلف ..... ۱۲
۱-۷ رابطهٔ بین دمای نقطهٔ شبنم، مونواکسیدکربن و هوای اضافی ..... ۱۳
۱-۸ تغییرات اتلاف انرژی در بویلر نسبت به دمای گازهای خروجی و محدودهٔ خوردگی ..... ۱۵
۱-۹ طرح ساده و شماتیک یک بویلر نیروگاهی ..... ۱۷
۱-۱۰ درام در بویلر لوله آبی ..... ۱۷
۱-۱۱ گردش دربویلرلوله آبی ..... ۱۷
۱-۱۲ وضعیت سوپرهیترها دربویلر ..... ۱۸
۱-۱۳ طرز کار شماتیک گرمکن هوا ..... ۱۹
۱-۱٤ طرز کار شماتیک اکونومایزر ..... ۱۹
۱-۱۵ نمایی از دیگ بخار نیروگاه طوس ..... ۲۰
۱-۱٦ مسیر هوای احتراق در نیروگاه طوس ..... ۲۱
۱-۱۷ افت فشار سیستم احتراق بویلر ( بدون پیش‌گرمکن هوا ) ..... ۲۳
۱-۱۸ افت فشار سیستم احتراق بویلر ( با پیش‌گرمکن هوا ) ..... ۲۳
۱-۱۹ اثر دودکش در بویلرها ..... ۲۳
۱-۲۰ مقدار مکش دودکش بر حسب ارتفاع و دمای گازهای خروجی ..... ۲۵
۱-۲۱ آرایش اجزاء سیستم احتراق بویلرهای تحت فشار ..... ۲۵
۱-۲۲ پروفیل فشار در بویلرهای تحت فشار (بدون پیش‌گرمکن هوا) ..... ۲۵
۱-۲۳ پروفیل فشار در بویلرهای تحت فشار ( با پیش‌گرمکن هوا ) ..... ۲٦
۱-۲٤ آرایش اجزاء سیستم احتراق بویلرهای تحت خلاء ( با پیش‌گرمکن هوا ) ..... ۲٦
۱-۲۵ آرایش اجزاء سیستم احتراق بویلرهای تحت خلاء ( بدون پیش‌گرمکن هوا ) ..... ۲٦
۱-۲٦ مشخصهٔ جریانی دمپر هوا ..... ۲۸
۱-۲۷ دمپرهای با مکانیزم زاویه‌ای ..... ۲۸
۱-۲۸ منحنی مشخصهٔ جریان برای دمپرهای با مکانیزم زاویه‌ای ..... ۲۹
۱-۲۹ منحنی مشخصهٔ جریان برای دمپرهای با مکانیزم موازی ..... ۲۹
۱-۳۰ نحوهٔ عملکرد محرک‌های نیوماتیکی دمپر هوا ..... ۳۰

| شکل | عنوان | صفحه |
|---|---|---|


۱-۳۱ نحوهٔ عملکرد محرک‌های الکتریکی دمپر هوا ..... ۳۰
۱-۳۲ منحنی‌های مشخصهٔ فن‌های دور متغیر ..... ۳۲
۱-۳۳ ترکیب دمپر و فن‌های دور متغیر ..... ۳۲
۱-۳٤ مقایسهٔ روش‌های کاهش توان مصرفی ..... ۳٤
۱-۳۵ مراحل مورد نیاز جهت احتراق کامل ..... ۳۵
۱-۳٦ منحنی نمونهٔ تغییرات هوای اضافی بر حسب بار ..... ۳٦
۱-۳۷ آرایش تجهیزات اندازه‌گیری و تقلیل فشار گاز طبیعی ..... ۳۷
۱-۳۸ آرایش تجهیزات پمپاژ و گرمایش سوخت مازوت ..... ۳۷
۱-۳۹ منحنی لزجت بر حسب دما برای سوخت مازوت ..... ۳۹
۱-٤۰ ایجاد ورتکس در جریان هوای ورودی مشعل ..... ۳۹
۱-٤۱ انواع مختلف مشعل‌های گازی ..... ٤۱
۱-٤۲ مشعل گازی اسپاد ..... ٤۱
۱-٤۳ مشعل‌های جریان مماسی با قابلیت تغییر زاویه ..... ٤۲
۱-٤٤ دیفیوزر در مشعل‌های سوخت مایع ..... ٤٤
۱-٤۵ اتمیزاسیون مازوت ..... ٤٤
۱-٤٦ نازل Y شکل جهت پودرکردن سوخت مایع ..... ٤٤
۱-٤۷ نوک مشعل‌ها با اتمیزاسیون فشاری ..... ٤٤
۱-٤۸ سطح مقطع مشعل با جریان برگشتی ..... ٤۵
۱-٤۹ مشعل با هوای اضافی کم ..... ٤۵


فصل دوم :


۲-۱ آنتالپی مطلق اتم اکسیژن و اکسیژن دو اتمی ..... ۵۰
۲-۲ رآکتور با جریان یکنواخت ..... ۵۰
۲-۳ آنتالپی احتراق بصورت گرافیکی ..... ۵۲
۲-٤ دمای آدیاباتیک شعله بصورت گرافیکی ..... ۵۲
۲-۵ محدودهٔ تعادلی برای واکنش شیمیایی آدیاباتیک ..... ٦۰
۲-٦ محدودهٔ تعادلی برای واکنش شیمیایی آدیاباتیک ..... ٦۰


فصل سوم :


۳-۱ مدلی برای کوره ..... ۷۱
۳-۲ تغییر دبی حجمی هوا با زاویهٔ دمپر هوا ..... ۷۱
۳-۳ حجم کنترل اکسیژن ..... ۷۲
۳-٤ حجم کنترل اکسیژن ..... ۷۳
۳-۵ سوختن در حالت استاتیکی ..... ۷٤

## فهرست جداول

**جدول** **عنوان** **صفحه**


فصل اول :

۱-۱ مشخصات گاز طبیعی ایران ..... ۳۶

۱-۲ مشخصات دو نوع سوخت مازوت ..... ۳۶

۱-۳ اطلاعاتی در مورد مشعل‌های سوخت مایع ..... ۴۶

فصل دوم :

۲-۱ نسبت هوا به سوخت استوکیومتری برای متان و کربن جامد ..... ۵۰

۲-۲ اوزان اتمی المانهای موجود در سوخت ..... ۵۳

۲-۳ ترکیب هوا و حجم‌های نسبی هر کدام از اجزاء آن ..... ۵۴

فصل سوم :

۴-۱ مقایسهٔ نتایج استاتیکی حاصل از برنامهٔ *ProdResp1.m* با نتایج مرجع ٤ برای نسبت تعادلی ۱/۲۵ ..... ۱۰۱

۴-۲ مقایسهٔ نتایج استاتیکی حاصل از برنامهٔ *ProdResp1.m* با نتایج مرجع ٤ برای نسبت تعادلی ۰/۷٤ ..... ۱۰۱

۴-۳ مقایسهٔ نتایج حاصل از برنامهٔ *ProdResp2.m* با مرجع ۱۷ ..... ۱۰۱

# فصل اول

# تعریف و اهداف پروژه

## ۱-۱ مقدمه

یک سیستم کنترل احتراق اطلاعاتی پیرامون میزان اکسیژن موجود در محصولات احتراق که از دودکش خارج می‌شود را گرفته و آن را با نقطهٔ تنظیم جهت احتراق کامل مقایسه کرده و خطای حاصله را اصلاح می‌کند. پارامتر کنترلی ممکن است میزان اکسیژن موجود در محصولات احتراق یا میزان مونواکسید موجود در محصولات باشد که در واقع سیستم کنترلی باید طوری عمل کند که هیچیک از این دو در محصولات احتراق وجود نداشته باشند زیرا وجود آنها باعث اتلاف در سیستم و کاهش راندمان می‌شود بخصوص که مونواکسید کربن باعث آلودگی هوا نیز می‌شود.

وجود اکسیژن در محصولا ت احتراق نشان می‌دهد که هوای دمیده شده توسط دمپر هوا گرم شده و سپس از دودکش به بیرون رانده می‌شود که در این حالت هوای دمیده شده به کوره بیشتر از مقدار هوایی بوده که برای احتراق کامل لازم است. وجود گاز بسیار سمی و خطرناک مونواکسیدکربن نیزدر محصولات احتراق نشان می‌دهد اکسیداسیون کامل رخ نداده و میزان هوای دمیده شده کمتر از مقدار لازم برای احتراق استوکیومتری است.

ایجاد این سیستم کنترل احتراق، مستلزم مدلسازی سیستم در حالت دینامیکی می‌باشد. این مدل شامل قسمت‌های مختلف مسیر سوخت و هوا در بویلر می‌باشدکه یکی از مهمترین آنها محفظه احتراق است. هدف اصلی این پروژه یافتن میزان محصولات احتراق در حالت دینامیکی برای محفظهٔ احتراق می‌باشد. البته المانهای دیگر مدل دینامیکی نظیر موتور پله‌ای، دمپر هوا، محفظهٔ جمع‌کننده، کانال گازهای احتراق، سنسور اکسیژن و دودکش نیز بطور مختصر آورده شده است تا طراح سیستم کنترل بتواند از توابع تبدیل هر کدام استفاده کرده و سیستم کنترل را پیاده‌سازی نماید.

برای اینکه خواننده دید بیشتری نسبت به پارامترهای مؤثر در احتراق در نیروگاه داشته باشد در قسمت ۱-۳ ابتدا مروری بر این عوامل داشته و طرق بهینه‌سازی احتراق بررسی می‌شود. سپس برای شناسایی بیشتر مسیر سوخت وهوا در بویلرهای نیروگاهی در قسمت ۱-٤ بخش‌های مختلف بویلر از این دیدگاه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

بعلت آنکه مدل محفظه احتراق شامل تعدادی معادلات دیفرانسیلی است که بعضی از پارامترهای موجود در این معادلات بستگی به مقادیر احتراق در حالت پایدار دارند ابتدا در فصل دوم احتراق در حالت پایدار بررسی شده است که علاوه بر معرفی پارامترهای لازم، روش محاسبهٔ محصولات احتراق در حالت پایدار با در نظر گرفتن کلیهٔ محصولاتی که امکان تولید دارند نیز بیان شده است. در فصل سوم نیز تک تک توابع تبدیل المانهای مسیر سوخت و هوا به دست آمده است که آنچه در این پروژه اهمیت بیشتری دارد یافتن معادلات گذرا در محفظهٔ احتراق می‌باشد که قادر است پاسخ محفظهٔ احتراق را از نظر میزان محصولات خروجی، در برابر ورودی سوخت وهوا محاسبه نماید.

در آخرین فصل الگوریتم برنامه‌های کامپیوتری نوشته شده برای پاسخ دینامیکی محفظهٔ احتراق ارائه شده و نتایج این برنامه‌ها بازای تحریک های مختلف (دبی حجمی‌هوا) برای انواع سوخت‌ها آورده شده است. در نهایت مقایسه‌ای بین روش‌های مختلف مورد استفاده در این پروژه و نتایج آنها انجام می‌شود.

## ۱-۲ مرور ادبیات

در سال ۱۹۷٦ آقایان گوردن[۱] و مک برایـد[۲] در مقالهٔ منتشر شده از سازمان ناسا[۳] یک برنامهٔ کامپیوتری جهت محاسبهٔ ترکیب تعادل شیمیائی، بازده راکت و شوک‌های برخورد کننده و منعکس شده ارائه نمودند [۱].

در سال ۱۹۷۸ کمپانی بابکوک و ویلکاکس[٤] در کتاب *Steam, it's generation and use* نیز مبحثی پیرامون اصول احتراق عنوان نمود که در آن الگوریتم‌هایی جهت محاسبهٔ محصولات احتراق برای سوخت‌های زغال‌سنگ، گاز طبیعی و گازوئیل ارائه شده است که در چاپ‌های بعدی این کتاب یک نمودار گرافیکی آورده شده که برای انواع سوخت‌ها درهوای اضافی مختلف، محصولات احتراق قابل محاسبه می‌باشند[۲].

در سال ۱۹۸۱ نیز آقای رینولدز[٥] یک برنامهٔ کامپیوتری برای آنالیز تعادل شیمیایی با روش مینیمم کردن تابع گیبس ارائه کرد[۳]. در این مقاله و مقاله منتشر شده توسط ناسا فقط تئوری کار توضیح داده شده و لیست برنامه‌های کامپیوتری آنها نیز در دسترس نیست. تئوری این مباحث در کتاب‌های جدید احتراق (مراجع ٤ و٥) نیز یافت می‌شود. لازم به ذکر است که در تمامی موارد عنوان شده محصولات احتراق در حالت پایدار بررسی شده وبحثی از حالت دینامیکی احتراق نمی‌شود.
طرح مسألهٔ دینامیکی احتراق در بویلر توسط آقای کرتنیک[٦] آغاز شد و در مقاله‌ای که در سال ۱۹۸۵ ارائه نمود معادلات دینامیکی احتراق در بویلرهای نیروگاهی را بیان کرد و یک مدل گذرا از سیستم احتراق درآورد و این مدل را با نتایجی که از تست یک نیروگاه درکشور یوگوسلاوی بدست آورده بود مقایسه کرد که نشان می‌داد مدل خوبی است [٦]. بعد از آن

---

[۱] Gordon
[۲] McBride
[۳] NASA
[٤] Babcock & Wilcox
[٥] Reynolds
[٦] Cretnik

آقایان فانستیل[1] و آیزرمن[2] با استفاده از این مدل برای محفظهٔ احتراق و مدلسازی قسمت‌های دیگر مسیر سوخت و هوا در بویلر یک کنترل کنندهٔ $PI$ طراحی نمودند و در نهایت یک سیستم کنترل احتراق بدست آمد [۷]. پارامترکنترل کننده در این سیستم‌ها، میزان اکسیژن موجود در محصولات احتراق می‌باشد که توسط سنسور اکسیژن حس می‌شود. سیستم‌کنترل احتراق کاملتری نیزبعداً توسط آقای ریلی[3] و همکارانش طراحی و پیاده سازی شده است که میزان اکسیژن و مونواکسیدکربن تولید شده بعنوان پارامترهای کنترلی درنظر گرفته شده‌اند[۸]. روش‌های دیگری بغیر از روش استفاده از مدل ذکر شده برای محفظهٔ احتراق جهت پیاده‌سازی سیستم خودکار احتراق وجود دارد که در مراجع۹و۱۰یافت می‌شود.

## ۱-۳ بهینه سازی احتراق

اصلی‌ترین اتلاف انرژی در احتراق، اتلاف حرارت بصورت گرمای محسوس می‌باشد، یعنی اتلافی که در حین انتشار گازهای حاصل از احتراق به اتمسفر صورت می‌گیرد. برای کاهش این اتلاف انرژی دو نکته را باید رعایت کرد. اول کاهش جرم این گازهای داغ با کنترل کردن نسبت سوخت به هوا و دوم کاهش دمای این گازها با بکارگیری مبدل‌های حرارتی از جمله پیش‌گرمکن‌های هوا. اکنون به بررسی این روش‌ها می‌پردازیم :

### ۱-۳-۱کنترل نسبت سوخت به هوا

شکل ۱-۱ اتلاف انرژی از سیستم احتراق ایده‌آل را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود با هوای اضافی کم احتراق ناقص بوده و مونواکسید کربن، دوده و مواد جامد تولید می‌شود. اگر هوای اضافی افزایش یابد اتلاف حرارتی نیز افزایش می‌یابد. بازده حداکثر سیستم هنگامی رخ می‌دهد که مونواکسید کربن بسیار کم بهمراه حداقل اتلاف انرژی داشته باشیم. برای این منظور حلقهٔ کنترل باید نسبت سوخت به هوا را (در تمامی شرایط کارکرد) در این نقطه نگاه دارد.

#### ۱-۳-۱-۱ عوامل مؤثر بر بازده احتراق

عواملی که بر سیستم احتراق واقعی (نه ایده‌آل) مؤثرند عبارتند از:

- مخلوط شدن هوا و سوخت : تغییر در نرخ سوختن مستلزم تغییر در دبی هوا و سوخت ورودی به مشعل‌ها می‌باشد که همزمان با آن، مخلوط شدن هوا و سوخت باید همچنان با کیفیت باقی بماند زیرا خوب مخلوط نشدن هوا با سوخت باعث می‌شود که قسمتی از هوای احتراق هرگز در فرآیند احتراق شرکت نکرده و در نتیجه باید هوای اضافی بیشتری برای احتراق کامل به مشعل‌ها وارد نمائیم.

- تقسیم سوخت و هوا در سیستم‌های چند مشعلی : در سیستم‌های چند مشعلی فرض می‌شود که هر مشعل بطورجداگانه، مقدار یکسانی از هوا و سوخت در شرایط کارکرد مختلف خواهد داشت، در صورتیکه مسلماً بعضی مشعل‌ها با هوای اضافی بیشتری نسبت به بقیه کار می‌کنند و در نتیجه در مشعل‌های دیگر دوده و ذرات جامد تولید می‌شود. برای اجتناب از

---

[1] Pfannstiel

[2] Isermann

[3] Reilly

تولید این مواد و غنی شدن سوخت از هوای مورد نیاز در تمامی مشعل‌ها سیستم احتراق با هـوای اضـافی بیشـتری نسـبت بـه حالت ایده‌آل کار می‌کند که البته این امر باعث اتلاف حرارتی بیشتر در سیستم و کمتر شدن بازده سیستم می‌گردد.

- اتمیزاسیون سوخت مایع : در حالتی که سوخت مایع داریم لازم است که سوخت بصـورت اسپری نـرم، اتمـیزه شـود. بـا تغییر کردن نرخ سوختن و در نتیجه تغییر دبی سوخت وهوا کیفیت اتمیزاسیون از دست رفته و بـازده آن تغییـر می‌کنـد ودر نتیجه سوخت به نرمی و با سرعت نمی‌سوزد. بنابراین با کاهش بازده اتمیزاسیون، هوای اضافی بیشتری لازم است تا احـتراق کامل حاصل شود که البته این باعث افزایش اتلاف حرارت محسوس می‌شود.

- پودر کردن سوخت جامد : دو قسمت اصلی سیستم‌های زغال‌سوز عبارتند از پودر کننده و مشعل. پودر کننده، زغال را به پودرهای نرم تبدیل می‌کند و مشعل مخلوط پودر و هوای اولیـه را بـا هـوای ثانویـه درنسبت‌های معینـی مخلـوط می‌نمـاید. بنابراین عدم کارکرد صحیح درهر کدام از این قسمت‌ها، نیاز به هوای بیشتری ایجاد کرده تا احتراق کـامل حـاصل گـردد، که این هوای بیشتر باعث اتلاف می‌گردد.

- خرابی مشعل : مشعل نیز مانند هر وسیلهٔ دیگری نیاز به تعمیر و مواظبت دارد. مشعل‌ها برای محدوده‌های مشخص طراحی شده‌اند تا بازدهی خوبی داشته باشند و لذا خرابی آنها باعث بازدهی کم در احتراق گردیده و نتیجتـاً هـوای اضـافی بیشـتری جهت احتراق کامل لازم خواهد بود.

بنابراین مقدار هوای اضافی که در شکل۱-۱ معرف بازده حداکثرمی‌باشد تغییر می‌کند. ایـن مطلـب در شـکل۱-۲ بوضـوح دیده می‌شود یعنی مقدار هوای اضافی در بازده حداکثر حالت ایده‌آل (مقدار $A_1$) به مقدار $A_2$ تغییر کرده و اتـلاف انـرژی از $E_1$ به $E_2$ افزایش می‌یابد و در نتیجه مقدار $E_2$ معرف بازده حداکثر، قابل دسترسی دراین نسبت سوخت به هوا می‌باشـد. بنابراین برای رسیدن به بازده حداکثر لازم است که مطالب زیر را درنظر داشت.

۱- نسبت سوخت به هوا را در شرایط مختلف احتراق بصورت اتوماتیک کنترل کرده تا بازده احتراق همیشه حداکثر باشد.
۲- هر تغییر در شرایط احتراق که باعث کارکرد غیر صحیح می‌شود را به‌سرعت تشخیص داده و اپراتور به عکس العمل در برابر آن آگاه باشد تا سیستم به حالت بهینه با بازده حداکثر باز گردد.

### ۱-۳-۱-۲ روش‌های کنترل نسبت سوخت به هوا

اندازه‌گیری اکسیژن در گازهای احتراق : رویت اکسیژن اضافی در گازهای حاصل از احتراق و رسیدن به کمـترین هـوای مورد نیاز برای احتراق کامل روشی است که از قدیم مرسوم بوده است. در سالهای اخیر استفاده از پروب اکسـیژن زیرکنیـا (شکل۳-۱۱) این تکنیک را بسیار قابل اطمینان نموده که نسبتاً هم ارزان می‌باشد. مزیت این روش اینست که بـازده احـتراق مستقیماً قابل محاسبه می‌باشد. معایب این روش نیز عبارتند از :

- با تغییر شرایط احتراق لازم است که مقدار هوای اضافی نیز تغییر کند تا احتراق کامل باشد. یعنی نقطهٔ تنظیم کنترل بـرای اکسیژن اضافی باید بر طبق این تغییر شرایط، تغییر کند. اما تغییر دقیق شرایط احتراق بطور کلـی ناشـناخته اسـت و در نتیجـه یافتن این نقطهٔ تنظیم مشکل است و بنابراین معمولاً مقدار اکسیژن اضافی باندازهٔ کافی زیادتر انتخـاب می‌گـردد تـا احـتراق