بسم الله الرحمن الرحيم

١٥٧٤٥٥

دانشگاه ارومیه

دانشکده فنی مهندسی- گروه مهندسی مکانیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

گرایش تبدیل انرژی

عنوان:

# بررسی عددی احتراق در یک محفظه احتراق و تاثیر پارامتر های احتراق در تولید آلاینده ها

دانشجو:

**حسین عریانی**

اساتید راهنما:

**دکتر شهرام خلیل آریا**

**دکتر صمد جعفرمدار**

دی ماه ۱۳۸۹

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
پژوهشگاه علوم و فناوری اطلاعات ایران
مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
IRANDOC

۱۵۷۴۵۵

۱۳۹۰/۳/۵

پایان نامه خانم/آقای ...حسین عربلو... به تاریخ ۲۹/۱۰/۸۹
شماره ۳۴۵-۲ف/ مورد پذیرش هیات محترم داوران با رتبه عالی
و نمره ... قرار گرفت.

۱ - استاد راهنما و رئیس هیئت داوران : (استاد حسین آریا)

۲ - داور خارجی : دکتر رسول شعبان

۳ - داور داخلی : دکتر ایرج میرزایی

٤ - نماینده تحصیلات تکمیلی : دکتر جواد نوری نیا

٥ - استاد راهنمای دوم : دکتر محمد جعفر سالار

حق چاپ و نشر برای دانشگاه ارومیه محفوظ می باشد.

تقدیم به زیباترین فرشته زندگی ام

مادر

# تقدیر و تشکر

سپاس و ستایش برای اوست به خاطر الطاف بیکرانش، هدایتهای روشنگرش و محبت های بی دریغش.

بر خود لازم می دانم از زحمات اساتید راهنمای ارجمندم آقایان دکتر خلیل آریا و دکتر جعفر مدار به خاطر کمک های بی شائبه شان در انجام این پایان نامه، صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم.

از خانواده عزیزم که همه دلگرمی و امیدم به زندگی هستند سپاسگزارم.

از اساتید محترم گروه مکانیک دانشگاه ارومیه که در دوره کارشناسی ارشد از حضورشان فوائد بسیار برده ام تقدیر و تشکر می کنم.

همچنین از همه دوستان دوران دانشگاه و هم اتاقی های عزیزم که بودن در کنار آنها تحمل غربت را برایم آسان نمود، بخصوص دوستان عزیزم صمد مجیدی فر، پدرام مهاجری، وحید فتحی، حسن خاتم نژاد، آرش نعمتی، مهدی صحبتی، رضا طلایی، مهدی دادگر، یاسر حسینی، امیر خسروی و مصطفی رحیمی تشکر و قدردانی می نمایم.

حسین عریانی

زمستان ۱۳۸۹

# چکیده

فهمیدن اینکه فرم اکسید نیتروژن[1] در محفظه احتراق کجا و چگونه تشکیل می شود برای کارایی و عملکرد پاک و درست بویلرها[2] و برنرها[3] بسیار اهمیت دارد، همچنین اهمیت این مشکل اساسا بدلیل ارتباط آنها با آلودگی‌هایی است که به طور وسیع از کورهای بزرگ نیروگاه های گرمایی انتشار می‌یابد.

هدف از این مطالعه بررسی عددی مشکل انتشار اکسید نیتروژن از کوره یک برنر صنعتی و یک بویلر نیروگاهی است که با سوخت گاز کار می‌کند.

در این پایان نامه از رژیم احتراقی MILD[4] به منظور دست یافتن به توزیع دمای همگن استفاده شده است، و با استفاده از روشهایی مانند گردش داخلی گازهای خروجی مقدار اکسید نیتروژن کاهش یافته است، همچنین اثر گردش خارجی گازهای سوخته شده مانند دی اکسید کربن[5]، بخار آب[6] و نیتروژن[7] از طریق ورود این گازها از مقطع سوخت و هوا در یک برنر صنعتی بررسی شده است.

معادلات بقا جرم، مومنتوم، انرژی، معادلات انتقال گونه ها، توربولانس، احتراق، مدل تابش بعلاوه معادلات مدل اکسید نیتروژن حل شده اند تا توزیع دما و توزیع اکسید نیتروژن را ارائه دهد. مطالعه این شبیه سازی توزیع اکسید نیتروژن را در محفظه احتراق و گازهای خروجی در شرایط مختلف کاری نسبت سوخت به هوا و دمای هوای ورودی فراهم می کند. این شبیه سازی بینش وسیعی را در ارتباط بین دمای محلی و غلظت اکسید نیتروژن ارائه می دهد.

به منظور اعتبار دهی مراحل محاسباتی، مقایسه ای بین محاسبات اخیر با مقادیر تجربی برای یک حالت خاص صورت گرفت.

نتایج نشان می دهد هنگامیکه احتراق MILD اعمال شود، دمای متوسط و دمای ماکزیمم کوره کاهش می یابد و پروفیل دما همگن می‌گردد. این پدیده باعث می‌شود تا اکسید نیتروژن گرمایی به طور محسوس کاهش یابد، همچنین نتایج نشان می دهد در نرخ گردش مشابه، گردش خارجی گازهای خروجی از طریق مقطع سوخت نسبت به مقطع هوا در جهت کاهش انتشار اکسید نیتروژن موثرتر است، و رقیق ساز بخارآب بدلیل ظرفیت گرمایی بزرگتر نسبت به گازهای نیتروژن و دی اکسید کربن موثرتر است.

**کلمات کلیدی:** احتراق MILD ، شبیه سازی، انتشار اکسید نیتروژن، دینامیک سیالات محاسباتی[8]، برنر صنعتی، بویلر صنعتی

---

[1]. $NO_x$ Formation
[2]. Boiler
[3]. Burner
[4]. Moderate or Intense Low-oxygen Dilution
[5]. $CO_2$
[6]. $H_2O$
[7]. $N_2$
[8]. CFD

فهرست مطالب

عنوان ..... صفحه

چکیده ..... I
فهرست مطالب ..... II
فهرست اشکال ..... VI
فهرست جداول ..... IX
علائم اختصاری ..... X
علائم یونانی ..... XI
زیرنویس‌ها ..... XII

فصل اول: مقدمه و ساختار پایان‌نامه ..... ۱

۱-۱ مقدمه ..... ۱
۱-۲ ساختار کلی پایان‌نامه ..... ۳

فصل دوم: کلیات و مروری بر کارهای انجام یافته ..... ٤

۲-۱ مقدمه ..... ٤
۲-۲ بررسی انواع شعله ها و رژیم های احتراقی ..... ٤
۲-۲-۱ تقسیم بندی شعله ها ..... ٤
۲-۲-۲ چهره اصلی احتراق شعله (Flame Combustion) ..... ٥
۲-۲-۳ چهره اصلی احتراق بی شعله (Flameless Combustion) ..... ٥
۲-۲-٤ چهره کلی احتراق Mild ..... ۹
۲-۲-٤-۱ جنبه فیزیکی ..... ۱٦
۲-۲-٤-۲ اختلاط ..... ۱۸
۲-۲-٤-۳ جنبه دینامیک سیالاتی ..... ۱۹
۲-۲-٤-٤ جنبه شیمیایی و ترمودینامکی ..... ۲۱
۲-۲-٤-٥ جنبه سینتیکی ..... ۲٤
۲-۲-٤-٦ انتشار نور و تبادل احتراقی تابشی و جابجایی ..... ۲٥

۲-۲-٤-۷ کارایی/ قابلیت اطمینان و مزایای اقتصادی ..... ۲۷
۲-۲-٤-۸ تجهیزات با فشار بالا ..... ۲۷
۲-۲-٤-۹ جنبه اصلی مربوط به مزایای کاربردهای محیطی ..... ۲۸
۲-۲-٤-۹-۱ توقف فرم Soot ..... ۲۸
۲-۲-٤-۹-۲ کاهش تشکیل اکسید نیتروژن ..... ۲۹
۲-۳ مطالعات انجام شده در رژیم احتراقی Mild ..... ۳۰
۲-٤ جنبه جدید بودن و نوآوری کار حاضر ..... ۳۷

**فصل سوم: کلیاتی درباره آلاینده اکسید نیتروژن ..... ۳۹**

**۳-۱ آلاینده $NO_x$ و مضرات آن ..... ۳۹**

**فصل چهارم: معادلات حاکم بر مدل ..... ٤۱**

٤-۱ مقدمه ..... ٤۱
٤-۲ معادلات اساسی که در این مدل بکار می رود: ..... ٤۱
٤-۲-۱ معادلات مومنتوم، پیوستگی و انرژی ..... ٤۱
٤-۲-۲ انتقال گرمای تابشی ..... ٤٤
٤-۲-۳ انواع مدلهای احتراق ..... ٤۸
٤-۲-٤ معادلات مدل احتراقی انتقال گونه ها ..... ٥۱
٤-۲-٥ آنالیز انتشار آلاینده ها ..... ٥٥

**فصل پنجم: شبیه سازی عددی ..... ٦۱**

٥-۱ مقدمه ..... ٦۱
٥-۱-۱ طرح مدل کوره صنعتی ..... ٦۲
٥-۱-۲ شبکه محاسباتی کوره صنعتی ..... ٦٤
٥-۱-۳ شرایط مرزی مدل ..... ٦٦
٥-۱-٤ مدل فیزیکی کوره صنعتی ..... ٦۷
٥-۱-٥ جزئیات حل ..... ٦۸
٥-۱-٦ روش گسسته سازی ..... ٦۹

۵-۱-٦ ارتباط سرعت – فشار (معادله تصحیح فشار) ..... ٦٩
۵-۱-۷ معیار همگرایی ..... ۷۰
۵-۲ طرح مدل بویلر صنعتی ..... ۷۲
۵-۲-۱ شبکه محاسباتی کوره صنعتی ..... ۷۳
۵-۲-۲ شرایط مرزی مدل بویلر صنعتی ..... ۷٤
۵-۲-۲ مدل فیزیکی بویلر صنعتی ..... ۷۵

**فصل ششم: بررسی و تحلیل نتایج مدل ..... ۷٦**

٦-۱ مقدمه ..... ۷٦
٦-۲ بررسی استقلال از شبکه ..... ۷۷
٦-۳ بررسی صحت نتایج مدل حاضر با نتایج تجربی ..... ۷۹
٦-٤ بررسی نتایج حاصل از اعمال شرایط Mild بر روی کوره صنعتی ..... ۸۱
٦-٤-۱ میدان سرعت ..... ۸۱
٦-٤-۲ توزیع غلظت توربولانس ..... ۸۲
٦-٤-۳ توزیع دما در محفظه احتراق ..... ۸۳
٦-٤-٤ انتشار اکسید نیتروژن در محفظه احتراق ..... ۸٤
٦-۵ بررسی پارامتریک بر روی کوره صنعتی ..... ۸٤
٦-۵-۱ اثر افزایش دبی هوای ورودی ..... ۸٤
٦-۵-۲ اثر افزایش دمای هوای ورودی ..... ۸٦
٦-۵-۳ تاثیر رقیق سازی سوخت و هوا توسط گازهای رقیق ساز ..... ۸۷
٦-۵-۳-۱ بررسی روش (FGR) ..... ۸۸
٤-۵-۳-۲ بررسی روش (FIR) ..... ۹۰
٦-۵-۳-۳ مقایسه روشهای FGR و FIR ..... ۹۳

**فصل هفتم : بررسی و تحلیل نتایج مدل بویلر صنعتی..... ۹٤**

۷-۱ مقدمه ..... ۹٤
۷-۱-۱ اعتباردهی مدل بویلر صنعتی ..... ۹٤

۷-۱-۲ طراحی بویلر با رژیم احتراق MILD ..... ۹۶
۷-۱-۳ اثر افزایش سرعت هوا ی ورودی ..... ۹۸
۷-۱-٤ عکس العمل توربولانسی-شیمیایی ..... ۱۰۳
۷-۱-۵ اثر افزایش سرعت هوا روی تولید آلاینده اکسید نیتروژن ..... ۱۰٤
۷-۱-٦ تاثیرفاکتور هوای اضافی ..... ۱۰۵
۷-۱-۷ مقایسه بویلر صنعتی با بویلر احتراقی MILD ..... ۱۰۷

**فصل هشتم: نتیجه‌گیری کلی و پیشنهادات ..... ۱۰۹**

۷-۱ مقدمه ..... ۱۰۹
۷-۲ نتیجه‌گیری کلی ..... ۱۰۹
**۷-۲-۱ نتایج بدست آمده از مدل برنر صنعتی ..... ۱۱۰**
**۷-۲-۲ نتایج بدست آمده از مدل بویلر صنعتی ..... ۱۱۰**
۷-۳ پیشنهادات برای کارهای آتی ..... ۱۱۲

**منابع و مراجع ..... ۱۱۳**

# فهرست اشکال

عنوان ..... صفحه


شکل ۲ – ۱ نمایی ار برنر با احتراق بی شعله FLOX ..... ٦

شکل ۲ – ۲ . شماتیک محدوده پایداری : **A** منطقه با شعله پایدار **B** منطقه ناپایدار **C** منطقه احتراق بی شعله ..... ۷

شکل ۲ – ۳ : توزیع دما در دو حالت شعله های پایدار و احتراق بی شعله ..... ۸

شکل ۲ – ٤ : مقادیر اندازه گیری شده برای دما و غلظت رادیکالهای OH در شعاه های توربولانسی و احتراق بی شعله ..... ۸

شکل ۲ – ٥ : دمای کاری راکتور به صورت تابعی از دمای ورودی برای حالت استوکیومتریک مخلوط متان اکسیژن و نیتروژن ۱۰

شکل ۲ – ٦ : $\Delta T$ محاسبه شده در درون محفظه واکنش برحسب دمای ورودی و شرایط آدیاباتیک شعله.....

برای مخلوط متان / اکسیژن / نیتروژن ..... ۱۲

شکل ۲ – ۷ : مدهای احتراقی مختلف برای مخلوط برای مخلوط متان / اکسیژن / نیتروژن..... ۱۳

شکل ۲ – ۸ : تعریف شرایط احتراقی **Mild** بر طبق نظریه **Oberlack** ..... ۱٤

شکل ۲ – ۹ : میانگین مجذور قطر قطرات بنزین در یک محیط داغ به صورت تابعی از زمان ..... ۱۷

شکل ۲–۱۰ : ارتباط بین جریان جرمی سوخت و هوا به صورت تابعی از مختصات محوری x/d ..... ۲۰

شکل ۲ – ۱۱ : دمای اولیه دمای تعادل و دمای ماکزیمم به صورت تابعی از کسر اختلاط در غلظت مولی اکسیژن ۰/۲۱ ..... ۲۲

شکل ۲ – ۱۲ : دمای اولیه دمای تعادل و دمای ماکزیمم به صورت تابعی از کسر اختلاط در غلظت مولی اکسیژن ۰/۰۵ ..... ۲۳

شکل ۲ – ۱۳ : عکسهایی از شعله پروپان در دمای ۱٤۰۰ درجه کلوین و شرایط سطوح غلظت اکسیژن مختلف ..... ۲٦

شکل ۲ – ۱٤ : کسر حجمی soot برای شعله دیفوزیونی در شرایط تجربی مختلف ..... ۲۸

شکل ٥ – ۱ : آرایش هندسی کوره با رژیم احتراقی**MILD** ..... ٦۲

شکل ٥ – ۲ : برش طولی از کوره صنعتی ..... ٦۳

شکل ٥ – ۳ . مدل متقارن محوری کوره (به صورت یک قطاع ٥ درجه) ..... ٦٦

شکل ٥ – ٤ : قسمتهای مختلف بویلر صنعتی (الف): محفظه احتراق و قسمت جابجایی (ب): نمایی از مشعل ..... ۷۲

شکل ٥ – ٥ : ساختار شبکه محاسباتی مشعلها و قسمتهای دیگر بویلر ..... ۷۳

شکل ٦–۱ : توزیع دما شعاعی برای سه شبکه ساخته شده تحت مختصات محوری مختلف ..... ۷۷

شکل ٦–۲ : مقایسه توزیع دما شعاعی بین مدل حاضر و مدل تجربی تحت مختصات محوری مختلف..... ۸۱

شکل ٦–۳ : میدان سرعت در قسمت ورودی برنر..... ۸۲

شکل ٦– ٤ : توزیع غلظت توربولانسی در محفظه احتراق..... ۸۲

شکل ٦– ٥ : توزیع دما در محفظه احتراق ..... ۸۳

شکل ٦– ٦ : توزیع اکسید نیتروژن در محفظه احتراق ..... ۸٤

شکل ٦–۷ : تاثیر دبی هوای ورودی روی الف) پروفیل دما و ب) تولید آلاینده اکسید نیتروژن ..... ۸٥

شکل ٦– ۸ : تاثیر دمای هوای پیش گرم شده ورودی روی الف) پروفیل دما و ب) تولید آلاینده اکسید نیتروژن ..... ۸۷

شکل ٦ – ۹ : پروفیل دما بر حسب کسر جرمی اکسیژن در حالت **FGR** ..... ۸۹

شکل ٦– ۱۰ : میزان تولید اکسید نیتروژن بر حسب کسر جرمی اکسیژن در حالت **FGR** ..... ۸۹

شکل ٦ – ١١ : پروفیل دما بر حسب کسر جرمی سوخت در حالت FIR ..... ٩١
شکل ٦- ١٢ : میزان تولید اکسید نیتروژن بر حسب کسر جرمی اکسیژن در حالت FGR ..... ٩٢
شکل ٦ – ١٣ : مقایسه تولید اکسید نیتروژن در حالت FGR و FIR ..... ٩٣
شکل ٧ – ١ : پروفیل دمای (بر حسب کلوین) در صفحه افقی عبوری از مشعل دوم با مختصات z = ٤.٦٦٢ متر..... ٩٥
شکل ٧ – ٢. توزیع دما در قسمت تابشی بویلر: (الف) توزیع دما شعاعی در x=٢/٥ متر، (ب) توزیع دما طولی یا محوری در.....
y =٥/٥ متر ..... ٩٦
شکل ٧ – ٣. مقایسه تولید اکسید نیتروژن بین مدل عددی Habib و مدل حاضر ..... ٩٦
شکل ٧ – ٤. آرایش هندسی بویلر بهینه سازی شده با احتراق MILD ..... ٩٧
شکل ٧ – ٥ : مدل متقارن محوری بویلر (به صورت یک قطاع ٤٥ درجه) ..... ٩٨
شکل ٧ – ٦. توزیع دما برای (الف) $A_{air_{in}}$ = ٠/٦٨ متر مربع (ب) $A_{air_{in}}$ = ٠/٠٨ متر مربع ..... ٩٩
شکل ٧ – ٧ . پروفیل دمای شعاعی برای دو مساحت ورودی هوا ( $A_{air_{in}}$ = ٠/٦٨ ، $A_{air_{in}}$ = ٠/٠٨ متر مربع )..... ١٠١
تحت مختصات محوری .....
شکل ٧ – ٨ . پروفیل دمای محوری در وسط دریچه هوای ورودی برای دو مقطع مختلف هوا ..... ١٠٢
شکل ٧ – ٩ :. توزیع غلظت توربولانسی برای: الف) $A_{air_{in}}$ = ٠/٦٨ ، ب) $A_{air_{in}}$ = ٠/٠٨ متر مربع ..... ١٠٣
شکل ٧ – ١٠: تاثیرات مقطع هوا روی مقدار کل تولید اکسید نیتروژن..... ١٠٥
شکل ٧ – ١١: تاثیر فاکتور هوای اضافی روی مقدار تولید اکسید نیتروژن ..... ١٠٥
شکل ٧ – ١٢: تاثیر فاکتور هوای اضافی روی ماکزیمم دمای شعله..... ١٠٦
شکل ٧ – ١٣ : مقایسه میزان اکسید نیتروژن تولیدی بین بویلر صنعتی و بویلر طراحی شده، در حالت نرخ سوخت ثابت ..... ١٠٧
شکل ٧ – ١٤ : مقایسه ماکزیمم دمای شعله بین بویلر صنعتی و بویلر طراحی شده، در حالت نرخ سوخت ثابت ..... ١٠٧
شکل ٧ – ١٥ : مقایسه متوسط دمای محفظه احتراق بین بویلر صنعتی و بویلر طراحی شده، در حالت نرخ سوخت ثابت ..... ١٠٨

# فهرست جداول

عنوان ..... صفحه

جدول ۵ – ۱. مدل فیزیکی و طرح شیمیایی کوره ..... ۶۳
جدول ۵ – ۲. شرایط مرزی کوره صنعتی ..... ۶۶
جدول ۵ – ۳. ابعاد هندسی بویلر صنعتی ..... ۷۳
جدول ۵ – ٤. شرایط مرزی بویلر صنعتی ..... ۷٤
جدول ۵ – ۵. مدل فیزیکی و طرح شیمیایی مدل بویلر صنعتی ..... ۷۵
جدول ۷ – ۱. ابعاد هندسی و شرایط ورودی بویلر صنعتی ..... ۹۸
جدول ۷ – ۲. تاثیرات سرعت هوا روی دما و مقدار تولید اکسید نیتروژن ..... ۱۰٤

# علائم اختصاری

| | |
|---|---|
| مساحت سطحی $[m^2]$ و یک ضریب مشخص | $A$ |
| مساحت مقطع هوای ورودی | $A_{air_{in}}$ |
| دبی جرمی | $m$ |
| کسر مولی | [ ] |
| گازهای خروجی | $EG$ |
| مختصات محوری | $x$ |
| کسر مولی | $X$ |
| هوای اضافی | $e_{air}$ |
| درجه گردش گازهای سوخته شده در منطقه واکنش | $k_R$ |
| مختصات شعاعی | $r$ |
| توان $[W]$ | $P$ |
| ضریب پخش $[m^2/s]$ | $D$ |
| انرژی اکتیواسیون $[J]$ | $E_a$ |
| سوخت | F |
| هوا | A |
| شتاب گرانش $[m/s^2]$، کسر جرمی گاز باقیمانده | $g$ |
| دمای اولیه $[K]$ | $Initial\ Temperature$ |
| دمای ورودی $[K]$ | $T_{in}$ |
| ثابت واکنش | $k$ |
| جرم $[kg]$ | $m$ |
| وزن مولکولی | $M$ |
| کسر جرمی ازت موجود در سوخت | $MFR$ |
| انتقال حرارت $[J]$ | $Q$ |
| ثابت جهانی گاز $[J/mol.k]$ | $R$ |
| عدد رینولدز | $Re$ |
| دما $[K]$ | $T$ |
| سرعت $[m/s]$ | $u$ |

# علائم یونانی

| | |
|---|---|
| ضریب انتقال حرارت جابجائی $[J/m^2.K]$ | $\alpha$ |
| ثابت تجربی و زاویه انعکاس | $\beta$ |
| چگالی $[kg/m^3]$ | $\rho$ |
| نسبت اکی‌والانس | $\phi$ |
| لزجت $[Pa.s]$ | $\mu$ |
| ضریب صدور گاز | $\varepsilon$ |
| مشخصه زمانی اختلاط توربولانس | $\tau_R$ |

# زیرنویس‌ها

| | |
|---|---|
| بردار یکه مکانی | *i* |
| گونه شیمیایی | *k* |
| شبکه | *cell* |
| آشفته | *t* |
| آرام | *l* |
| اکسیژن | *ox* |

# فصل اول

# مقدمه و ساختار پایان‌نامه

## ۱-۱ مقدمه

انتشار آلودگی اکسید نیتروژن[1] از بعضی تجهیزات صنعتی مانند بویلرها[2]، کوره های صنعتی، برنرها[3]، کوره توربینهای گاز و بسیاری از تجهیزات دیگر تقریبا بالاست، و این آلودگی تاثیر مهمی روی محیط زیست دارد. کنترل و کاهش انتشار اکسید نیتروژن از احتراق سوختهای گازی یک مفهوم بین المللی است، چون این آلودگی تولید بارانهای اسیدی کرده و همچنین دود و مه فتوشیمیایی را به وجود می آورد. به دلیل این پیامدها یک سازماندهی بین المللی در دنیا به وجود آمده تا از محدود کردن آلودگی هوا حمایت کند و با ایجاد یک طرح کلی انتشار آلودگی اکسید نیتروژن را در اتمسفر متوقف کند. رژیم احتراقی Mild تکنیکی است که می تواند نقش مهمی در کاهش آلودگی های تولیدی از احتراق و همچنین گازهای گلخانه ای ایفا کند. اهمیت این احتراق در صنعت مربوط است به چند مقوله مهم. اول بدلیل پتانسیل بالا، بازدهی بیشتر این رژیم احتراقی نسبت به رژیم های دیگر در سیستمهای مختلف، دوم آلودگی پایین این نوع احتراق اعم از سوت[4] و اکسید نیتروژن می باشد، و همچنین بدلیل افزایش دمای پایین و کاهش ماکزیمم دما، می تواند در سیستمهایی که بدلیل مواد و آلیاژهای خاص نیازمند محدودیت دمایی هستند مورد استفاده قرار گیرد. پروفیل دمای همگن که جزء ذات رژیم احتراقی Mild می باشد می تواند مزایای زیادی را برای سیستم های کاربردی ایجاد کند.

احتراق Mild براساس در مقوله دمای بالای واکنش دهنده ها و افزایش دمای پایین در فرآیند احتراق محاسبه می شود. این چهره از احتراق نتیجه به کار گیری چندین تکنولوژی و تکنیک از گرایش های کاربردی مختلف است. در این راستا باید اصول و فنون کاربردی این نوع از احتراق را شناخت. اطلاعات درباره این احتراق بدلیل هویت جدید این گرایش، پراکنده

---

[1]. $NO_x$
[2]. Boiler
[3]. Burner
[4]. Soot

است. بنابراین توجهات و تفکرات زیادی به منظور کشف تمامی چهار چوبهای این نوع احتراق در کاربردهای جدید به وجود آمده است. در این راستا ابتدا باید تأثیرات فیزیکی، شیمیایی و ترمودینامیکی متغیرها را برروی پارامترهای خروجی بررسی کرد.

جنبه فیزیکی این پدیده، مربوط است به پاشش یا نفوذ (اتمیزه کردن[1])، تبخیر، اختلاط و انتقال گرمای تابشی به ویژه اختلاط لایه ها در حالت دمای بالای رقیق سازی منطقه واکنش.

اثر ترمودینامیکی بر تحلیل مقایسه ای مینیمم دما، ماکزیمم دما و پروفیل دمای تعادلی در برابر کسر اختلاط در تمامی رنج های مجاز برای موارد رقیق سازی و بدون رقیق سازی دلالت دارد.

اثر شیمیایی، بر اساس نرخ سینتیک شیمیایی برای مسیر های اکسیداسیون مختلف و تکامل زمانی پروسه خود اشتعالی می باشد. در چنین روشهایی رژیم های خود اشتعالی بر اساس مسیرهای سینتیکی شیمیایی مختلف، شناخته می شوند و بین شرایط رقیق سازی و بدون رقیق سازی مقایسه می گردند. در این موارد، نشان داده می شود که شرایط احتراق Mild می تواند در رنج های دما – فشار مختلف گسترش یابد.

بعضی از موارد استفاده از این سیستم احتراقی می توان به محفظه احتراق توربینهای گاز، بویلرها و همچنین سیستم های گرمایش خانگی و ... اشاره کرد. اهمیت و تأکید این سیستم بر، کارایی و میزان انتشار آلایندگی است. مزایای محیطی این نوع سیستم، مربوط است به گونه های انتشاری مختلف که از احتراق سوخت مایع یا گاز از قبیل، مواد کربن دار، هیدروکربنهای نسوخته، اکسید نیتروژن و اکسیدهای گوگرد.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به عنوان یک تکنیک از سال ۱۹۶۰ برای پیش بینی مسئله احتراق به کار گرفته شده است و معادله های فیزیکی با تکنیک های عددی ترکیب شدند. مدل های احتراقی در یک محفظه احتراق بر اساس معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی و معادلات انتقال گونه ها بوده که با مدلهای توربولانسی مانند $k-\varepsilon$ کوپل می شوند. برای مدل کردن احتراق با فاز گاز، می توان با فرض واکنشهای شیمیایی سریع به حل سریع معادلات دست یافت. این مدلها برای شبیه سازی انواع سیستم های احتراقی به کار می روند. بنابراین در این پایان نامه با استفاده از این تکنیکها به بررسی رژیم احتراقی Mild و تحلیل پارامترهای مختلف بر عملکرد این سیستم احتراقی پرداخته می شود.

[1]. Atomization

## ۱-۲ ساختار کلی پایان‌نامه

در این پایان‌نامه، پس از مروری بر پژوهش‌های گذشته، در فصل سوم بـه بررسـی مضـرات آلاینـده اکسـید نیتـروژن و روشهای کنترل و کاهش انتشار آن از تجهیزات صنعتی پرداخته می‌شود. در فصل چهارم به بررسی معادلات حاکم بـر جریـان سیال و فرآیند احتراق و همچنین معادلات حاکم بر تولید آلاینده‌ها پرداخته می‌شود. در فصل پنجم نحوه مدلسازی انجام شده برروی محفظه احتراق یک برنر صنعتی[1] و یک بویلر صنعتی[2] به صورت جدا مورد مطالعه قرار گرفته و روش‌های انجـام کـار و انتخاب مدلهای مناسب جهت اعمال کردن این نوع رژیم احتراقی، بررسی می شود. در فصل ششم به بررسی نتایج حاصـل از شبیه‌سازی بر روی برنر صنعتی با رژیم احتراقی Mild ، و مقایسه آن با مقادیر تجربی پرداخته می شود، همچنین به اعمـال متد های مختلف رقیق سازی با گازهای خروجی و تاثیر تغییرات هندسی و پارامترهای مختلف نظیر سـرعت و دمـای هـوای ورودی برروی فرایند احتراق و تولید آلاینده اکسید نیتروژن پرداخته می‌شود. در فصـل هفـتم نتـایج حاصـل از اعمـال رژیـم احتراقی Mild را بر روی یک بویلر صنعتی نیروگاهی مورد مطالعه قرار می گیرد تـا بتـوان بـا بکـار گیـری ایـن متـد جدیـد احتراقی، بهبودی را در زمینه کاهش آلایندگی منتشره از احتراقهای مرسوم در نیروگاههای بخـار انجـام داد، و در انتهـا نتـایج بدست آمده برای پروفیل دما و انتشار اکسید نیتروژن با مقادیر بدست آمده قبلی مقایسه می شود. بـرای مـدل سـازی تمـامی مراحل بالا، از کد نرم‌افزاری *ANSYS FLUENT 12* که به کمک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بـه مدلسـازی میـدان جریان در داخل محفظه احتراق می‌پردازد، استفاده شده است. نهایتا در فصل هشتم نتیجه‌گیری کلی و ارائه پیشـنهاداتی بـرای کارهای آتی آورده شده است.

---

[1] . Industerial Burner
[2] . Industrial Boiler

# فصل دوم
# کلیات و مروری بر کارهای انجام یافته

## ۲-۱ مقدمه

این فصل از دو قسمت کلی تشکیل شده است در قسمت اول به بررسی کلی انواع مدهای احتراقی، انواع شعله های مختلف، معرفی رژیم احتراقی Mild ، کاربرها و مزایای آن پرداخته و همچنین جنبه های مختلف این نوع از احتراق، اعم از جنبه فیزیکی، ترمودینامیکی، سینتیکی، اقتصادی و آلایندگی آن بررسی می شود. در قسمت دوم کارهای صورت گرفته در این زمینه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته می شود.

## ۲-۲ بررسی انواع شعله ها و رژیم های احتراقی

### ۲-۲-۱ تقسیم بندی شعله ها

هنگامی که مخلوط احتراق پذیری از سوخت و اکسیژن محترق شود، شعلهٔ سوخت اغلب به صورت مرئی گسترش می یابد. به همین دلیل بر طبق مسیری که سوخت و جریان اکسیداسیون در درون یک برنر[1] پاشش می شود، اغلب دو نوع شعله در سیستم های احتراقی معمول به وجود می آورد:

۱. شعله های پیش آمیخته[2]

۲. . شعله های دیفوزیونی[3]

برای شعله های پیش آمیخته، سوخت و جریان اکسیداسیون قبل از اینکه در محفظه احتراق، محترق شوند، با هم به خوبی ترکیب می شوند. واکنش در طی محدودهٔ فروزان و روشن اتفاق می افتد که سرعت ترویج شعله با سرعت اختلاط گاز همگام می شود. برای شعله های دیفوزیونی، سوخت و جریان اکسیژن به صورت جدا وارد محفظه احتراق می شوند.

---

[1] . Burner
[2] . Premixed Flame
[3] . Diffusion Flame