مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران ۲۵ و ۲۴ آبان ۱۳۹۶، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف FCCI-2018-1067

بهینهسازی شعله ترکیبی گاز طبیعی توسط الگوریتم ژنتیک NSGA2 در کانترا

علی سعیدی استادیار- دانشگاه بیرجند Ali.saeedi@birjand.ac.ir

رضا جلالی مهرآباد دانشجوی کارشناسی ارشد-دانشگاه بیرجند

امیر حسین حسین زاده دانشجوی کارشناسی ارشد-دانشگاه بیرجند

چکیدہ

تحقیق حاضر در یک کار عددی و با نگاه سینتیکی به بررسی شعله ترکیبی گاز طبيعي و ذرات دوده پرداخته است. محصولات احتراق ناقص بهعنوان رهیافتی جدید در راستای کنترل تولید آلایندهها به ترکیب اضافهشده و اثر این هم سوزی بر دمای واکنش و کسر مولی گونههای NO و CO در حالت مجزا و ترکیبی مورد تحلیل قرار گرفته است. مدل سازی رفتار احتراقی ذرات دوده توسط مدل پیشنهادی رفتار گازی ارائه شده و درصد بهینه ترکیب افزودنیها توسط الگوریتم ژنتیک چندهدف محاسبه شده است و مقادیر خروجی در دو حالت احتراق عادی و احتراق ترکیبی مقایسه شدهاند. نتایج این تحلیل در گام اول نشان میدهد افزودن دوده به احتراق متان باعث افزایش دمای شعله و افزایش آلایندههای اکسید نیتروژن و مونواکسید کربن می شود. در نقطه مقابل افزودن محصولات احتراق ناقص متان موجب کاهش دمای شعله و کاهش آلایندههای اکسید نیتروژن و مونواکسید کربن خواهد شد. اما اثر ترکیبی این دو افزودنی و بررسی بهینهسازی ژنتیک نشان داد ترکیب حجمی، ۶ الی ۸ درصد محصولات احتراق ناقص، ۳ البی ۴ درصد دوده و گاز متان در نسبت همارزی ۱۰ الی ۱۱ در عین کاهش ۶ درصدی دما، موجب کاهش ۷۰ درصدی کسر مولی NO و کاهش ۱۹ درصدی کسر مولى CO خواهد شد.

كلمات كليدى: گاز طبيعى، شعله تركيبى، دوده، بهينهسازى ژنتيك

مقدمه

امروزه آثار مخرب زیستمحیطی ناشی از احتراق سوختهای فسیلی بیش از هر زمان توجه جامعه جهانی را به خود جلب کرده است. محققان عامل اصلی پدیدههای مهمی از قبیل گرم شدن کره زمین، بارانهای اسیدی، مه دود فتوشیمیایی و بیماریهای تنفسی انسان را آلایندههای منتشرشده از احتراق این سوختها معرفی کردهاند [۱, ۲]. از این روز موضوعات تحقیقاتی مختلفی تمرکز خود را به بررسی و کاهش هرچه بیشتر این آلایندهها معطوف نمودهاند [۳].

دراین بین، سوخت گاز طبیعی از مهم ترین منابع انرژی صنعتی به شمار رفته [۴] و در یک نگاه جامع تر تحقیقات مختلف نشان از سهم ۲۷ درصدی آن در تولید جهانی انرژی دارند[۵]. از این رو با توجه به رتبه دوم ایران در ذخایر گاز طبیعی جهان [۶] تحقیق و توسعه هر چه بیشتر آن از جنبههای اقتصادی و چشم اندازهای ملی حائز اهمیت خواهد بود.

از سوی دیگر حجم انرژی حرارتی و راندمان عملکردی احتراق جنبه اساسی در طراحی صنعتی به شمار رفته که کنار دستیابی به احتراقی پاک، با کاهش مصرف سوخت، موجب تولید کمتر آلایندهها خواهد شد. شعله آبیرنگ گاز طبیعی از تابش حرارتی پایینی برخوردار بوده که این مهم موجب کاهش قابلتوجه راندمان آن شده است [۷]. لذا دستیابی با احتراق پاک، با افزایش همزمان تابش حرارتی ناشی از شعله این سوخت هدف دوسویه و قابل ارزشی بوده که مقاله حاضر به بررسی آن خواهد پرداخت.

استفاده از شعلههای ترکیبی یکی از کارآمدترین روشها برای دستیابی به اهداف چندگانه احتراقی است [۸] که تحقیقات مختلفی با استفاده از این روش به تلفیق گاز طبیعی با سایر سوختها و گونههای فعال پرداختهاند [۹–۱۳]. اما در بین گزینههای ترکیبی مختلف، با توجه به سطح اشتعال پذیری و اثر واکنشی ذرات ریز کربن میتوان برای بهبود عملکرد احتراق گاز طبیعی در تجهیزات صنعتی از این کونه بهره برد. علاوه بر آن منابع گسترده دوده و ذرات زغال سنگ که حاوی درصد بالایی کربن بوده با قیمت بسیار مناسب خود، پتانسیل قابل توجهی برای ترکیب با متان را دارا هستند [۱۴].

راکول و رانگوالا [۱۵] در یک تحقیق آزمایشگاهی و توسط فنّاوری HFA^۱ به بررسی اثر افزودن ذرات ریز پودر زغالسنگ به ساختار شعله پیش آمیخته متان پرداختند. تصویربرداری مختلف از شعله در این آزمایش نشان داد افزودن ذرات کربن علاوه بر درخشان نمودن شعله، سرعت و حجم شعله را نیز بسیار افزایش میدهد. نتیجه این آزمایش را میتوان در شکل ۱ مشاهده نمود.

در این راستا بررسیهای پور حسینی و مقیمان در اثر تزریق ذرات پودر زغالسنگ آنتراسیت (که بیش از ۹۵ درصد آن از کربن تشکیلشده است) به شعله گاز طبیعی [۱۶] نشان داد که تزریق این ذرات به داخل شعله گاز طبیعی، ضمن افزایش سطح واکنشی شعله و بهبود درخشندگی آن، با بهبود ضریب صدور تابش شعله، انتقال حرارت تابشی آن را ۴۳ درصد افزایش میدهد.

این نتایج آزمایشگاهی در کنار نتایج عددی سنتنو [۱۸] نشان از نقش مهم و بارز تزریق کربن بر بهبود تابش شعله گاز طبیعی دارد. لذا افزودن این گونه به ورودی احتراق متان را میتوان از بهترین روشهای بهبود تابش حرارتی شعله قلمداد کرد. اما در کنار جنبههای مثبت هم سوزی متان و دوده و تاثیر مثبت آن بر تابش شعله، اثر افزودن کربن به صورت دوده یا پودر زغال سنگ بر دیگر جنبههای مکانیزم احتراق متان موضوعی است که نیاز به بررسی بیشتری دارد.



شکل ۱ مقایسه شعله در حالت افزودن ذرات کربن و حالت عادی احتراق متان [۱۵] (سمت چپ احتراق طبیعی متان و سمت راست احتراق به همراه تزریق ذرات کربن (زغالسنگ))

ژاو و همکاران [۱۹] به بررسی اثر اندازه ذرات افزودنی پودر زغالسنگ به شعله پیش آمیخته متان-هوا در نسبتهای همارزی کمتر از ۱ پرداختهاند. نتایج نشاندهنده نقش مهم اندازه ذرات افزودنی کربن بر روند احتراق بوده به صورتی که افزودن ذرات با قطر کوچکتر از ۲۵ میکرون موجب افزایش دمای احتراق شده و برای ذرات با قطر بزرگتر از ۹۵ میکرون کاهش نسبی دما مشاهده میشود. لذا اندازه ذرات افزودنی از مشخصهای مهم در فرایند به شمار می رود.

علاوه بر آن هاروات و همکاران [۲۰] در یک کار عددی-آزمایشگاهی اثر افزودن ذرات ساییده شده زغالسنگ را به یک شعله پیش آمیخته متان موردبررسی قراردادند. نتایج آنان نشاندهنده تأثیر قابل توجه افزایش حضور ذرات کربن بر کسر مولی گونههای CO و CO2 است. همچنین الفیک و همکاران [۲۱] در یک کار آزمایشگاهی نشان دادن افزودن ذرات زغالسنگ ساییده شده به احتراق متان موجب افزایش تمایل به تولید گونه NO شده و کسر مولی این آلاینده احتراقی را افزایش خواهد داد.

با توجه به تحقیقات ارائه شده، شعله ترکیبی متان و ذرات دوده، موجب افزایش سطح تابشی شعله و بهبود راندمان احتراقی آن خواهد شد، اما از سوی دیگر افزایش کسر مولی آلاینده های احتراقی را نیز به همراه خواهد داشت که جنبه منفی این هم سوزی به شمار میرود. لذا در تحقیق حاضر به عنوان یک ترکیب جدید، اثر شعله ترکیبی متان، دوده و محصولات احتراق ناقص متان باهدف افزایش تابش و کنترل تولید آلاینده ها موردبررسی قرار خواهد گرفت. مدل سازی به صورت عددی و توسط مکانیزم واکنشی GRI3.0 و در کانترا انجام خواهد شد. اما فراتر از موضوع بررسی اثر این هم سوزی، بهترین ترکیب بین گونه ها و همچنین میزان هوای ورودی بهینه، توسط الگوریتم بهینه سازی ژنتیک چند هدفه به بوته تحقیق گذاشته خواهد شد.

مدلسازى

در این تحقیق گاز طبیعی به عنوان سوخت اصلی و دوده و محصولات احتراق ناقص متان بهعنوان افزودنى ها موردبررسى و تحليل سينتيكى واکنشها قرار خواهند گرفت. در مدلسازی احتراق متان، ترکیب سوخت (CH₄) و هوا (CH₄) و هوا (CH₄) بهصورت یک گاز ایدهال فرض شده و رفتار ترمودینامیکی سیال توسط معادله گاز کامل شبیهسازی می شود. اما همان طور که اشاره شد اندازه ذرات دوده مشخصهای مهم در بررسی رفتار احتراقی آن هاست. بردلی و همکاران در تحقیقات خود [۲۲, ۲۳] به صورت عددی و آزمایشگاهی به بررسی ترکیب احتراق متان و گرافیت در شرایط فشار پایین و تأثیر آن بر مشخصه های پایداری شعله پرداختهاند. آزمایشها با افزودن ذرات با قطر حدود ۴ میکرون انجامشده است. مدلسازی عددی در شرایط یک بعدی، با فرض چگالی ثابت برای ذرات کربن و حل معادلات بقای جرم، انرژی و مومنتوم و همچنین استفاده از مكانيزم واكنش Dixon [۲۴] انجام شده است. نتايج نشان ميدهد حل یک بعدی احتراق در شرایط مذکور از دقت نسبی برخوردار بوده اما فرض چگالی ثابت برای ذرات ریز کربن موجب شده تا مقادیر خطا در محاسبه کسر مولی گونههای احتراق و سرعت شعله آرام مشهود باشد. در ایـن راسـتا اکوف [۲۵] در یک تحقیق عددی با بررسی تأثیر ابعاد ذرات بر رفتار احتراقی آنان نشان داد با بزرگ شدن ابعاد ذرات، حداقل انرژی لازم برای اشتعال پذیری آن ها به صورت خطی افزایش یافته و تغییرات چگالی آن ها در

طی زمان احتراق بهصورت خطی کاهش مییابد. لذا در مدلسازی احتراق ذرات بزرگتر میتوان چگالی ذرات را ثابت فرض نمود اما برای ذرات ریز کربن تغییرات چگالی بیش از هر چیز بر روند پیشروی واکنش تأثیرگذار بوده و تغییرات آن باید موردبررسی قرار گیرد.

در این تحقیق بهعنوان یک مدل جدید، با فرض رفتار گازی برای ذرات ریز کربن از معادله گاز کامل برای مدلسازی رفتار احتراقی آنها استفاده خواهیم کرد. اعتبار سنجی این مدل و دقت استفاده از آن در بخش نتایج موردبررسی قرار خواهد گرفت. با توجه به تحقیقات ژاو و همکاران [۱۹] برای ذرات دوده با قطر بین سµ۰ الی سµ ۲۵ تغییرات چگالی محسوس بوده و با فرض رفتار گازی ذرات تحقیق حاضر به مدلسازی احتراقی ذرات کربن با قطر کمتر از ۲۵ میکرون خواهد پرداخت. مکانیزم احتراق مطابق شکل ۳ در یک راکت ور کاملاً پیش آمیخته و در فضای صفر بعدی موردبررسی قرار خواهد گرفت.

در شرایط صفر بعدی فرض شرایط دائم، دما و فشار یکنواخت و کسر مولی همگن در تمامی محدوده حجم کنترل حاکم است. فرایند دارای یک ورودی (واکنشدهندهها) و یک خروجی (محصولات) در حجم مشخص بوده لذا احتراق در شرایط فشار محیط و حجم ثابت رخ میدهد.

مکانیزم احتراق مطابق شکل ۲ در یک راکتور کاملاً آمیخته و در فضای صفر بعدی موردبررسی قرار خواهد گرفت. یونسی و همکاران [۲۶] با بررسی شرایط متفاوت دمایی و فشاری برای احتراق متان نشان دادند در شرایط فشار ۱ اتمسفر و دماهای بالاتر از ۲۵ ۱۵۰۰ شرایط تعادلی در واکنشهای زنجیرهای این مکانیزم حاکم است؛ لذا با فرض دمای عملکردی بالای ۱۵۰۰ در احتراق متان، واکنشهای زنجیرهای در حالت تعادلی بوده و معادلات شرایط تعادلی برای حل مقادیر مجهول اتخاذ خواهد شد.

نقطه تعادل یک فرآیند زمانی است که آنتروپی ماکزیمم و یا انرژی آزاد گیبس به کمینه مقدار خود برسد [۲۷]، لذا از این اصل برای محاسبه غلظت گونههای تشکیلشده در واکنشهای شیمیایی در شرایط تعادلی استفاده می گردد. روشهای عددی مختلفی جهت کمینهسازی معادله تابع گیبس و یافتن ترکیب تعادلی نهایی واکنش شیمیایی در تحقیقات مختلف استفادهشده است که با توجه به سرعت و دقت عملکردی روش EPM در تحقیق حاضر از این روش استفاده خواهد شد. ویرایش ابتدایی این مدل با نام استنجان⁽¹ [۲۸] در دانشگاه استنفورد ارائه شد و توسط اسمیت و میسن [۲۹] توسعه دادهشده است.



شکل ۲ طرح شماتیک راکتور پیش آمیخته

تمامی روابط مربوطه و حل دستگاه معادلات توسط کدهای کانترا [۳۰] در محیط متلب و با روش نیوتن میرا انجامشده است. از مکانیزم واکنشی GRI3.0 [۳۱] بهعنوان مرجع اطلاعات مربوط به واکنشهای زنجیرهای و خواص ترمودینامیکی گونههای حاضر در احتراق متان استفادهشده است.

بهینهسازی فرایند بر اساس ۳ هدف کاهش کسر مولی گونههای NO و CO و افزایش دمای آدیاباتیک شعله مدنظر است. متغیرهای ورودی درصد حجمی ترکیب دوده، محصولات احتراق ناقص و هوای موردنیاز احتراق (نسبت هم ارزی) است. لذا با ۳ متغیر ورودی و ۳ هدف خروجی مواجه هستیم که یک مسئله بهینهسازی چندهدفه خواهد بود. یکی از روشهای مناسب برای این گونه مسائل بهینهسازی چند هدف با استفاده از الگوریتم مناسب برای این گونه مسائل بهینهسازی چند هدف با استفاده از الگوریتم تکاملی است چراکه الگوریتمهای تکاملی (مانند الگوریتم ژنتیک) همواره با یک مجموعهای از ورودیها کار میکنند، ازاینرو میتوان از این الگوریتمها برای به دست آوردن یک مجموعه جواب بهینه پرتو استفاده نمود. در حال حاضر در بسیاری از تحقیقات درزمینهی بهینهسازی چندهدفه از الگوریتمهای تکاملی بهویژه الگوریتم ژنتیک استفاده میشود. روشهای مختلفی برای بهینهسازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائهشده است.

در بین مدلهای مختلف این روش با توجه به برتری روش مرتبسازی بر اساس معیار برتری (NSGA) از این روش بهره خواهیم برد. این روش در سال ۱۹۹۵ توسط دب برای حل مسائل چند هدفی ابداع شد و بر اساس روند مرتبسازی جوابهای غیر برتر، بهمنظور ارزش دادن و حفظ آنها بهعنوان نقاط خوب پایه گذاری شده است. از آنجایی که این الگوریتم بر اساس روند مرتبسازی جوابهای غیر برتر بنانهاده شده است به نام الگوریتم ژنتیک مرتبسازی غیر برتر¹ یا بهطور اختصار NSGA نامیده میشود [۳۳]. لازم به ذکر است در این تحقیق از مدل جدیدتر این روش که با عنوان INSGA- که در سال ۲۰۰۲ توسط دب و همکاران پایه گذاری شد [۳۳]، استفاده خواهد گردید. بهمنظور ارتباط بهتر کانترا و ژنتیک کد نویسی در فضای متلب انجامشده برای هر دو صورت گرفته است.

نتايج

مدلسازی تأثیر افزودن دوده با فرض حالت گازی و محصولات احتراق ناقص بر ثابت تعادلی و نرخ واکنشهای معرفیشده با کمک کدهای کانترا انجام شد. اعتبارسنجی عملکرد کد حاضر در شبیه سازی احتراق متان توسط نتایج آزمایشگاهی لوک و تساتسارونیز [۳۳] برای تغییرات دمای آدیاباتیک شعله در نسبت همارزی های مختلف متان-هوا صورت گرفت و نتایج عددی و آزمایشگاهی این مقایسه در شکل ۳ قابل مشاهده است. لوک و تساتسارونیز اب انغییر نسبت هم ارزی متان-هوا در محدوده ۱/۵ الی ۱/۴، تغییرات دمای آدیاباتیک شعله را گزارش کردند. در مدل سازی تحقیق حاضر در حالت احتراق طبیعی متان با تغییر محدوده نسبت همارزی مطابق مرجع موردنظر نمودار خط پر در شکل ۳ حاصل شد که در بیشترین حد دما نشاندهنده ۳ درصد خطا بین نتایج عددی و آزمایشگاهی است.

همانطور که اشاره شد مدلسازی افزودن ذرات ریز کربن با ارائه یک مدل جدید و استفاده از فرض رفتار گازی برای این ذرات توسط معادله گاز کامل انجامشده است. بررسی دقت عملکردی این مدل با مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی تحقیقات ژاو و همکاران [۱۹] و نتایج آزمایشگاهی بردلی و همکاران [۳۳] صورت میپذیرد.



شکل ۳ مقایسه نتایج عددی تغییرات دمای آدیاباتیک شعله با نتایج آزمایشگاهی [۳۳] در نسبت هم ارزی های مختلف

ژاو و همکاران [۱۹] به مدلسازی اثر افزودن ذرات دوده بر سوخت متان در حالت یک بعدی و به بررسی میزان تجزیه حرارتی ذرات دوده در محدوده دما بالای شعله پرداختهاند. نرخ تجزیه ذرات دوده با ابعاد بین • الی ۲۵ میکرون توسط مدل سشادری [۳۴] محاسبه شده و با فرض شرایط تعادلی و حل معادله انرژی و مومنتوم، مقادیر دما و ضخامت و سرعت آرام شعله محاسبه شده است. اعتبار سنجی نتایج این مدل در مقادیر سرعت آرام شعله با نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده دقت قابل قبول کد عددی ژاو است. مقایسه نتایج اثر افزودن دوده بر تغییرات دمای آدیاباتیک شعله در سه نسبت هم ارزی مختلف بین نتایج ژاو و همکاران و کد تحقیق حاضر در شکل ۴ نشان دهنده دقت قابل قبول فرض صفر بعدی و استفاده از معادله گاز کامل در این شرایط عملکردی است.

در شکل ۵ بهمنظور بررسی دقت محاسباتی یکبعدی اثـر هـم سـوزی متان و دوده، نتایج آزمایشگاهی بردلـی و همـکاران [۲۳] در مقادیر دمای



¹ Non dominated Sorting Genetic Algorithms



شکل ۵ اعتبار سنجی فرض رفتار گازی برای ذرات کربن با قطر ۴ میکرون با نتایج آزمایشگاهی بردلی و همکاران [۲۳]

آدیاباتیک شعله برای ترکیب حجمی ۷ درصد دوده و ۹۳ درصد متان برای ذرات دوده با قطر ۴ میکرون با نتایج کد عددی مقاله حاضر مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشاندهنده دقت قابلقبول فرض رفتار گازی برای ذرات دوده و استفاده از مکانیزم GRI3.0 در شبیهسازی احتراق متان و دوده است.

هم سوزی متان و کربن

تغییرات دمای آدیاباتیک شعله و کسر مولی دو گونه NO و CO با افـزودن دوده در شکل ۶ موردبررسی قرار گرفته است. ترکیب حجمی ۹ درصد کـربن و ۹۱ درصد متان به همراه ۱۵ درصد هوای اضافی به محفظه احتراق موجب افزایش دمای آدیاباتیک واکنش از ۲۱۹۴ کلوین (در حالـت بـدون افزودنی) به دمای ۲۲۵۹ کلوین خواهد شد و رشـد ۲/۹۷ درصـدی دمـای آدیاباتیک شعله را به همراه دارد.

از نگاه راندمان احتراق، این رشد دما نکته مثبت برای هم سوزی متـان-دوده به شمار میرود اما با توجه به رابطه تولید آلاینده مونواکسید نیتروژن با دمـا، افزایش نرخ دما موجب افزایـش تولیــد NO حرارتــی و رشـد کسر مولی



این گونه در محصولات خروجی خواهد شد [۳۵]. نمودار تغییرات NO در شکل ۶ تأییدکننده این موضوع است. افزودن دوده موجب افزایش کسر مولی NO از ۲۶۲۳ ppm تا ۴۰۰۰ شده و رشد ۵۳ درصدی کسر مولی این آلاینده مخرب را در محصولات خروجی به همراه دارد. علاوه بر آن مطابق نتایج ارائه شده افزودن کربن کسر مولی آلاینده مونواکسید کربن را نیز افزایش می دهد. نتایج نشان می دهد افزودن ۹ درصد دوده موجب افزایش حدود ۲۰٪ این آلاینده نسبت به حالت بدون افزودن دوده می شود.

همسوزى متان و محصولات احتراق ناقص

ابتدا از یک مول سوخت، α مول ($|\infty\rangle$) گاز طبیعی با هوا به نحوی واکنش میدهد که بیشترین مقدار دوده را بهعنوان محصولات احتراق داشته باشد. سپس محصولات این واکنش ناقص با ($(-\alpha)$) مول باقیمانده متان و ۱۵٪ هوای اضافی واکنش میدهند. مقادیر α بین ۰ تا 7، خواهد بود.



با توجه به فرایند احتراق ناقص، قسمتی از انرژی سوخت ورودی در این مرحله مصرف و افت دمایی قابل/نتظار است که نمودار شکل ۸ تاییدی بر این ادعاست. این نمودار تغییرات دمای آدیاباتیک شعله و کسر مولی دو گونه NO و CO را با هم سوزی متان و محصولات احتراق ثبت کرده است. نتایج نشان میدهد ترکیب حجمی ۳۰ درصد از محصولات احتراق ناقص با ۹۰ درصد متان در ورودی موجب کاهش دما از ۲۱۸۰ K تا ۱۵۹۲ خواهد شد. این کاهش ۲۷٪ دما در کنار تأثیر منفی که بر راندمان احتراق و انتقال حرارت تابشی، موجب کاهش تولید آلاینده احتراق نیز خواهد شد که نتایج نشان میدهد افزودن حجمی ۳۰ درصد محصولات احتراق ناقص به انتقال حرارت تابشی، موجب کاهش تولید آلاینده احتراق نیز خواهد شد که مرکیب ورودی، با کاهش دمای آدیاباتیک شعله موجب شده تا کسر مولی NO در محصولات خروجی با کاهش ۹۶ درصدی از mpm به ۲۷۸۴ به آلاینده مونواکسید کربن نیز در احتراق کاهش یابد.



هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶

تهران، دانشگاه صنعتی شریف

FCCI-2018-1067

با افزودن حجمی ۳۰ درصد محصولات احتراق نـاقص کسـر مـولی CO را از ۴۰۴۷ ppm به ۶۳۶ کاهش مییابد.

بهينهسازى

بهترین ترکیب برای متان، کربن، محصولات احتراق ناقص و میزان هوای ورودی برای کاهش تولید آلایندههای NO و CO و همچنین افزایش دمای شعله توسط فرایند بهینهسازی چندهدفه و کد NSGA2 موردبررسی قرار گرفت. در این بهینهسازی ورودی های الگوریتم، درصد حجمی افزودنی محصولات احتراق ناقص، درصد حجمی افزودنی کربن و حجم هوای ورودی به احتراق اصلی انتخاب شدند و اهداف بر اساس رویه مدنظر افزایش دمای آدیاباتیک شعله، کاهش کسر مولی آلایندههای NO و CO در خروجی قرار گرفتند. محدوده انتخاب برای افزودنی محصولات احتراق ناقص بین ۰٪ الی گرفتند. محدوده انتخاب برای افزودنی محصولات احتراق ناقص بین ۰٪ الی بین ۹ الی ۱۲ نسبت به یک حجم متان مدنظر قرار گرفته است. مقدار جمعیت تولیدی در هر مرحله بهینهسازی ۸۰ عدد و تعداد مراحل بهینهسازی ۳۰ مرحله خواهند بود.

بر اساس این ورودیها، پس از اجرای کد و دادهکاوی نتایج زیر حاصل شد. نمودارهای پارتو برای اهداف معرفیشده بهصورت دوتایی در شکلهای ۹ و ۱۰ ترسیمشده است که نشاندهنده جبهه ابتدایی انتخابی بین تمامی ورودیهای جمعیت پس از ۳۰ مرحله بهینهسازی است.

شکل ۹ نمودار پارتو کسر مولی آلاینده NO را بر اساس دمای آدیاباتیک شعله نشان می دهد. برخلاف گونه نیتروژن که ترکیبی بی ضرر است اکسیدهای آن خصوصاً دو مورد NO و NO بسیار خطرناکاند و برای سلامتی انسان و محیطزیست مضر می باشند. این اکسیدها در محفظههای احتراق تشکیل می شوند و همراه با گازهای حاصل از احتراق وارد محیطزیست شده و طی ترکیب با مواد دیگر هم چون هیدروکربنهای نسوخته و بخارآب منجر به تشکیل بارانهای اسیدی ، مه دود و ازن می شوند. این آلایندها از ترکیب نیتروژن موجود در هوا یا سوخت با اکسیژن موجود در هوای احتراق طی مکانیسمهای گوناگونی می توانند تشکیل می شوند. سه مکانیسم شاخته شده برای تولید NO عارتاند از:



شکل ۸ نمودار پارتو نتایج بهینهسازی کسر مولی آلاینده NO بر اساس دمای آدیاباتیک شعله

مکانیسم حرارتی ، سریع و سوختی. با توجه به اهمیت مکانیزم تولید NOx حرارتی نسبت به سایر مکانیسمهای تولید این آلاینده [۳۶]، روند تغییرات این آلاینده در احتراق کاملاً مطابق با تغییرات دمای آدیاباتیک شعله بوده و با افزایش دما افزایش خواهد یافت. کد بهینه سازی نیز همین روند را برای تولید این آلاینده پیش بینی کرده است. شکل ۸ نشان دهنده کمترین میزان تولید آلاینده NO در دماهای مختلف است. بررسی دقیق تر این مقادیر به صورت جدولی ارائه خواهد شد.

شکل ۱۰ نمودار پارتو کسر مولی CO را بر اساس دمای آدیاباتیک شعله نشان میدهد. تولید CO بیش از هر چیز به میزان HCO (فرمیل) تولیدی در احتراق و میزان تجزیه و تشکیل CO₂ وابسته است. مطابق شکل ۹ کسر مولی این آلاینده در محصولات خروجی احتراق ابتدا با افزایش دما تا حدود ۲۱۰۰ کلوین الی ۲۲۰۰ کلوین افزایشیافته و پس از رسیدن به مقدار بیشینه خود، با افزایش بیشتر مقادیر دما کاهش خواهد یافت. پراکندگی دادهها در این جبهه از نمودار پارتو به دلیل عدم تناسب مستقیم دما و تولید CO بوده که دور از انتظار نیست.

حال با توجه به فضای عمکلردی مورد هدف، محدود دمایی مدنظر برای كمترين ميزان توليد آلايندهها و دماي مناسب شعله بين ١٩٠٠ الي ٢١٠٠ کلوین انتخاب شد که داده های بهینه سازی در این بازه در جدول ۱ دستهبندیشده است. این مقادیر، متناسب با نسبت هم ارزی گزارششده در دادههای بهینه سازی جدول ۱ در جدول ۲ برای شرایط احتراق عادی متان نیز گزارش شده است که با مقایسه دو جدول می توان مشاهده نمود ترکیب بهینه احتراق متان و دو افزودنی حاضر، در اولین گام موجب کاهش نسبی دمای شعله خواهند شد اما از سوی دیگر کسر مولی آلاینده های احتراق را به طرز قابل توجهی کاهش میدهند. به عبارت دقیق تر ترکیبی این دو افزودنی و بررسی بهینهسازی ژنتیک نشان میدهد ترکیب حجمی ۶ الی ۸ درصد محصولات احتراق ناقص، ۳ الی ۴ درصد دوده و گاز متان در نسبت همارزی ۱۰ الی ۱۱ در عین کاهش ۶ درصدی دما، موجب کاهش ۷۰ درصدی کسر مولی NO و کاهش ۱۹ درصدی کسر مولی CO خواهد شد. لذا حضور كربن موجب درخشان شدن شعله خواهد شد و محصولات احتراق ناقص با کنترل آلایندههای احتراقی، کسر مولی این گونهها را کاهش خواهد 515



شکل ۹ نمودار پارتو نتایج بهینه سازی کسر مولی آلاینده CO بر اساس دمای آدیاباتیک شعله

هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶ تهران، دانشگاه صنعتی شریف

جدول ۱ نتایج بهینه سازی ژنتیک برای درصد حجمی ترکیب افزودنی های دوده (C)، محصولات احتراق ناقص متان (MICP) و حجم هوای ورودی (Air) به ازای یک حجم ترکیب متان و افزودنی ها

MICP	С	Air	Т	СО	NO
('/.)	(%)		(K)	(ppm)	(ppm)
8.09	2.61	10.94	1955.76	2659.34	380.59
7.35	3.71	10.51	2024.15	2918.01	773.37
6.46	5.51	11.13	1989.93	3051.11	488.79
13.08	4.21	9.69	1996.43	2477.32	692.49
9.79	4.55	11.21	1908.75	2539.24	221.89
8.22	3.09	11.07	1943.48	2649.46	327.86
3.52	4.39	10.95	2060.46	3333.30	984.15
8.22	3.09	11.28	1921.99	2581.84	256.60
8.58	3.70	10.10	2041.80	2813.76	990.56
6.07	4.07	10.65	2037.73	3068.21	848.04

نتيجهگيرى

مدلسازی سینتیکی شعله ترکیبی احتراق متان، دوده و محصولات احتراق ناقص توسط کدهای کانترا در محیط متلب اجرا شد و مدلسازی رفتار احتراقی ذرات کربن توسط فرض گاز کامل انجام شد. پس از بررسی مجزا تأثیر این دو افزودنی بر تغییرات دما، کسر مولی NO و CO، بهترین ترکیب متان و کربن و محصولات احتراق ناقص و همچنین حجم هوای ورودی توسط الگوریتم بهینه سازی ژنتیک NSGA2 بررسی شده و نتایج در نمودارهای پارتو و همچنین به صورت جدولی ارائه شد. در یک جمع بندی تحقیق حاضر نشان می دهد:

- استفاده از فرض رفتار گازی برای ذرات کربن با قطر کمتر از ۴ میکرون از دقت مناسبی برخوردار است.
- هم سوزی متان و دوده، در کنار نقش مثبت دوده بر تابش شعله، موجب افزایش کسر مولی آلایندههای NO و CO خواهد شد.
- هم سوزی متان و محصولات احتراق ناقص متان، موجب کاهش
 دما و کاهش کسر مولی آلاینده های مونواکسید نیتروژن و
 مونواکسید کربن خواهد شد.
- بررسی بهینه سازی ژنتیک نشان داد ترکیب حجمی ۶ الی ۸ درصد محصولات احتراق ناقص، ۳ الی ۴ درصد دوده و گاز متان در نسبت همارزی ۱۰ الی ۱۱ در عین کاهش ۶ درصدی دما، موجب کاهش ۷۰ درصدی کسر مولی NO و کاهش ۱۹ درصدی کسر مولی CO خواهد شد.
- لذا با ترکیب پیشنهادی، حضور کربن موجب درخشان شدن شعله و محصولات احتراق ناقص با کنترل آلایندههای احتراقی، کسر مولی این گونهها را کاهش خواهند داد.

جدول ۲ مقادیر دما و کسر مولی NO وCO برای احتراق طبیعی و غیر ترکیبی متان متناظر با حجم هوای ورودی در نتایج الگوریتم بهینهسازی ژنتیک درج شده در جدول ۱

MICP	С	Air	Т	СО	NO
(%)	(%)		(K)	(ppm)	(ppm)
0.00	0.00	10.94	2104.29	3186.58	1632.17
0.00	0.00	10.51	2145.88	3047.91	2619.60
0.00	0.00	11.13	2084.30	3207.59	1310.00
0.00	0.00	9.69	2219.32	2181.49	7346.56
0.00	0.00	11.21	2074.31	3209.37	1174.97
0.00	0.00	11.07	2089.29	3204.62	1383.61
0.00	0.00	10.95	2104.29	3186.58	1632.17
0.00	0.00	11.28	2069.32	3208.31	1113.08
0.00	0.00	10.10	2186.03	2728.96	4334.79
0.00	0.00	10.65	2134.12	3102.57	2284.48
			•		

مراجع

- Kampa, M. and E. Castanas, Human health effects of air pollution. Environmental Pollution, 2008. 151(2): p. 362-367.
- [2] Nagase, Y. and E.C.D. Silva, Acid rain in China and Japan: A game-theoretic analysis. Regional Science and Urban Economics, 2007. 37 :(\)p. 100-120.
- [3] Yoko Nagase, Emilson C.D. Silva, Acid rain in China and Japan: a game-theoretic analysis, Reg. Sci. Urban Econ. 37 (1) (2007) 100–120
- [4] Boke, Y.E. and O. Aydin, *Effect of the radiation surface on temperature and NOx emission in a gas fired furnace*. Fuel, 2009. 88(10): p. 1878-1884.
- Biresselioglu, M.E., T. Yelkenci, and I.O. Oz, *Investigating the natural gas supply security: A new perspective*. Energy, 2015.
 80: p. 168-176.
- [6] Bilgin, M., Geopolitics of European natural gas demand: Supplies from Russia, Caspian and the Middle East. Energy Policy, 2009. 37(11): p. 4482-4492.
- [7] Keramida ,E.P., et al., *Radiative heat transfer in natural gasfired furnaces*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000. 43(10): p. 1801-1809.
- [8] El-Ghafour, S.A.A., A.H.E. El-dein, and A.A.R. Aref, Combustion characteristics of natural gas-hydrogen hybrid fuel turbulent diffusion flame. International Journal of Hydrogen Energy, 2010. 35(6): p. 2556-2565.
- [9] Baek, S.W., et al., Effects of Addition of Solid Particles on Thermal Characteristics in Hydrogen-Air Flame. Combustion Science and Technology, 2 :(Λ)¹ Υ^e · · · ^{*} p. 99-116.
- [10] Guo, H., et al., Numerical study on the influence of hydrogen addition on soot formation in a laminar ethylene–air diffusion flame. Combustion and Flame, 2006. 145(1): p. 324-338.
- [11] Samanta, A., R. Ganguly, and A. Datta, *Effect of CO2 Dilution on Flame Structure and Soot and NO Formations in CH4-Air Nonpremixed Flames.* Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010. **132**(12): p. 124501-124501-5.
- [12] Wang, J., et al., Numerical study of the effect of hydrogen addition on methane-air mixtures combustion. International Journal of Hydrogen Energy, 2009. 34(2): p. 1084-1096.
- [13] Hu, G., et al., Experimental investigation on the effects of hydrogen addition on thermal characteristics of methane/air premixed flames. Fuel, 20:116.19 p. 232-240.
- [14] Dufaud, O., et al., Explosions of vapour/dust hybrid mixtures: A particular class. Powder Technology, 2009. 190(1): p. 269-273.
- [15] Rockwell, S.R. and A.S. Rangwala, *Influence of coal dust on premixed turbulent methane–air flames*. Combustion and Flame, 2013. 160(3): p. 635-640.
- [16] Pourhoseini, S.H. and M. Moghiman, Effect of pulverized anthracite coal particles injection on thermal and radiative characteristics of natural gas flame: An experimental study. Fuel, 2015. 140: p. 44-4.⁴
- [17] Obando, J., C. Lezcano, and A. Amell, *Experimental analysis*

of the addition and substitution of sub-bituminous pulverized coal in a natural gas premixed flame. Applied Thermal Engineering, 2017. **125**(Supplement C): p. 232-239.

- [18] Centeno, F.R., et al., Application of the WSGG model for the calculation of gas-soot radiation in a turbulent non-premixed methane-air flame inside a cylindrical combustion chamber. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016. 93: p. 742-753.
- [19] Xie, Y., V. Raghavan, and A.S. Rangwala, Study of interaction of entrained coal dust particles in lean methane–air premixed flames. Combustion and Flame, 2012. 159(7): p. 2449-2456.
- [20] Horvath, J.J., et al., Spectroscopic observations of methanepulverized coal flames .Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1984. 31(3): p. 189-201.
- [21] Elfeky, A., M. Abdelkhalek, and M. Kamal, *Pulverized coal combustion with opposing/cross-flow methane/air mixtures*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2014. **228**(6): p. 688-707.
- [22] Bradley, D., et al., *Structure of laminar premixed carbon methane-air flames and ultrafine coal combustion*. Combustion and Flame, 1994. **96**(1): p. 80-96.
- [23] Bradley, D., G. Dixon-Lewis, and S. El-Din Habik, *Lean flammability limits and laminar burning velocities of CH4-air-graphite mixtures and fine coal dusts.* Combustion and Flame, 1989. 77(1): p. 41-50.
- [24] Bradley, D., et al., Laminar flame structure and burning velocities of premixed methanol-air. Combustion and Flame, 1991. 85(1): p. 105-120.
- [25] Eckhoff, R.K., Does the dust explosion risk increase when moving from µm-particle powders to powders of nm-particles? Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012. 25(3 :(p. 448-459.
- [26] Younessi-Sinaki, M., E.A. Matida, and F. Hamdullahpur, Kinetic model of homogeneous thermal decomposition of methane and ethane. International Journal of Hydrogen Energy, 2009. 34(9): p. 3710-3716.
- [27] Turns, S.R., An introduction to combustion. 1996., New York: McGraw-hill
- [28] Reynolds, W.C., The Element potential Method For Chemical Equilibrium Analysis : STANJAN Program, in Department Of Mechanical Engineering. 1986: Stanford University.
- [29] William R. Smith, R.W.M., Chemical reaction equilibrium analysis : theory and algorithms 1982, University of Guelph.
- [30] Goodwin, D., Cantera: object oriented software for reacting flows. 2006, California Institute for Technology (Caltech.(
- [31] Smith, G.P., Golden, D.M., Frenklach, M., Moriarty, N.W., Eiteneer, B., Goldenberg, M., Bowman, C.T., Hanson, R.K., Song, S., Gardiner, W.C. Jr., Lissianski, V.V., Qin, Z, *GRI-Mech* 3.0. 2007.
- [32] Srinivas, N. and K. Deb, Muiltiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. Evolutionary Computation, 1994. 2(3): p. 221-248.
- [33] Lück, K.C. and G. Tsatsaronis, A study of flat methane-air flames at various equivalence ratios. Acta Astronautica, 1979. 6(3–4): p. 467-475.
- [34] Seshadri, K., A.L. Berlad, and V. Tangirala, *The structure of premixed particle-cloud flames*. Combustion and Flame, 1992. 89(3): p. 333-342.
- [⁴7] امیری، م. و م. مقیمان, اثر نسبت هم ارزی و زاویه واگرایی بر تشکیل آلاینده *NO*x در مسیرهای همگرا- واگرا. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز, ۲۰۱۶، ۱۹۶(۱): 73-92 .p
- [36] Ajilian Momtaz, A. and H. Momahedi Heravi, Experimental Study of Effects of Flue Gas Recirculation Technique on Maximum Flame Temperature and the NOx Emission of Gasoil and Biodiesel Combustion. Energy: Engineering & Managment, 2012. 2(3): p. 38-45.