

## مطالعه تجربی و بهینه‌سازی نسبت هم‌ارزی مشعل‌های گازسوز با استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت ارتقای عملکرد و کاهش آلاینده‌ها

امین جودت<sup>۱\*</sup>، مجتبی نجفیان<sup>۲</sup>، سعید شادمیر<sup>۳</sup>، کریم جعفریان<sup>۴\*</sup>

۱- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بجنورد، بجنورد، a.jodat@ub.ac.ir  
۲- رئیس اداره پژوهش، دانشگاه جامع علمی کاربردی خراسان شمالی، بجنورد، mn1362@gmail.com  
۳- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بجنورد eng.shadmira@gmail.com  
۴- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بجنورد Karim.Jafarian1@gmail.com  
\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۷، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸)

چکیده: در این پژوهش، به منظور بهبود عملکرد حرارتی و کاهش آلاینده‌های مشعل‌های گازسوز صنعتی، یک مطالعه تجربی بر روی دیگ فولادی با ظرفیت ۱۰۰۰۰۰ کیلوکالری بر ساعت انجام شد. پارامترهای کلیدی شامل دمای شعله، بازده احتراق و غلظت آلاینده‌های  $NO_x$  و CO در نسبت‌های مختلف هم‌ارزی اندازه‌گیری شد. همچنین برای ارزیابی هم‌زمان شاخص‌های عملکردی، از الگوریتم ژنتیک همراه با نرمال‌سازی داده‌ها در محیط نرم‌افزار متلب استفاده شد. نتایج نشان داد با افزایش نسبت هم‌ارزی از ۰/۵۵ تا ۰/۸۳، دمای شعله از ۹۵۰ به حدود ۱۱۰۰ کلوین افزایش یافت و بازده احتراق نیز به بیشینه مقدار خود رسید. در همین نقطه ( $\phi = 0/83$ )، غلظت  $NO_x$  بیشینه شد اما در محدوده استاندارد (کمتر از ۸۰ ppm) باقی ماند. در مقابل، کمترین مقدار CO در بازه  $\phi = 0.80-0.85$  مشاهده شد، هرچند در برخی شرایط از ۶۰ ppm فراتر رفت و به‌عنوان عامل محدودکننده در تعیین نقطه بهینه شناخته شد. بهینه‌سازی نشان داد مقدار بهینه نسبت هم‌ارزی برابر  $\phi = 0/83$  است؛ نقطه‌ای که بازده احتراق بیشینه و هر دو آلاینده در محدوده استاندارد قرار دارند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که تنظیم دقیق نسبت هوا به سوخت با بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، روشی مؤثر برای دستیابی به احتراقی پایدار و کم‌انتشار در مشعل‌های گازسوز صنعتی است.

کلیدواژه‌گان: مشعل‌های گازی، الگوریتم ژنتیک، نسبت هم‌ارزی، آلاینده، بازده، بستر آزمایشگاهی

### مقدمه

در دهه‌های اخیر، کاهش منابع سوخت‌های فسیلی مایع و جامد، افزایش قیمت جهانی نفت و تشدید نگرانی‌ها پیرامون اثرات زیست‌محیطی ناشی از مصرف این سوخت‌ها، موجب افزایش گرایش به گاز طبیعی شده است که به‌عنوان جایگزینی نسبتاً پاک‌تر نسبت به سوخت‌های مایع و جامد فسیلی، مقرون‌به‌صرفه و در دسترس است، هرچند از نظر انتشار کربن تا منابع تجدیدپذیر فاصله دارد [۱، ۲]. وجود ذخایر گسترده گاز طبیعی در بسیاری از کشورهای جهان، نقش آن را در سبب مصرف انرژی تقویت کرده و به‌ویژه در بخش‌هایی همچون گرمایش ساختمان‌ها، نیروگاه‌ها و فرآیندهای صنعتی حرارتی مورد توجه ویژه قرار داده است [۳].

یکی از مهم‌ترین مصرف‌کنندگان گاز طبیعی، مشعل‌های گازسوز مورد استفاده در تجهیزات گرمایشی و صنعتی هستند. این مشعل‌ها نه تنها نقش تعیین‌کننده‌ای در راندمان حرارتی سیستم‌ها ایفا می‌کنند، بلکه به‌طور مستقیم بر میزان انتشار آلاینده‌هایی همچون منوکسید کربن (CO) و اکسیدهای نیتروژن (NOx) اثر گذارند [۴]. افزایش تقاضا برای مشعل‌های گازسوز با راندمان بالا و آلاینده‌گی پایین، به‌ویژه در صنایع انرژی‌بر نظیر پتروشیمی، فولاد و نیروگاه‌ها، ضرورت پژوهش در زمینه بهینه‌سازی احتراق گاز طبیعی را دوچندان کرده است [۵، ۶]. استفاده گسترده از گاز طبیعی در این تجهیزات، در صورت عدم کنترل دقیق نسبت سوخت به هوا، می‌تواند منجر به کاهش بازدهی، افزایش تلفات انرژی و انتشار بیش از حد آلاینده‌ها شود [۷، ۸].

بهینه‌سازی عملکرد مشعل‌های گازی از طریق تنظیم دقیق نسبت هم‌ارزی ( $\phi$ ) به‌عنوان یک راهکار کلیدی در افزایش بازده حرارتی و کاهش آلاینده‌گی مطرح شده است. نسبت هم‌ارزی که بیانگر نسبت سوخت به هوا نسبت به مقدار استوکیومتری است، بر دمای شعله، نرخ واکنش شیمیایی، تولید آلاینده‌ها و در نهایت بازده احتراق اثر مستقیم دارد. در شرایط  $\phi < 1$  به دلیل هوای اضافی، دمای شعله کاهش یافته و احتراق ناقص ممکن است رخ دهد، در حالی که در نسبت‌های  $\phi > 1$  کمبود اکسیژن نیز منجر به احتراق ناقص خواهد شد. در هر دو وضعیت، نه تنها بازده را کاهش می‌دهند، بلکه منجر به افزایش انتشار CO و کاهش بهره‌وری انرژی خواهند شد [۹، ۱۰].

تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که ناحیه عملکرد بهینه مشعل‌ها در حوالی نسبت هم‌ارزی  $\phi \approx 1$  بسته به نوع مشعل، فشار کاری، طراحی هندسی، و نرخ پیش‌گرمایش متفاوت است و اگرچه در تحقیقات پیشین تعیین نسبت هم‌ارزی به‌صورت صرفاً عددی یا صرفاً تجربی مورد بررسی قرار گرفته است، اما هر یک از این رویکردها به‌تنهایی با محدودیت‌هایی همراه هستند. از این‌رو، به نظر می‌رسد ترکیب داده‌های تجربی با روش‌های محاسباتی هوشمند بتواند به تعیین دقیق‌تر این مقدار کمک نماید. به‌عنوان مثال، کانتیکانا و پرابها [۱۱] در مطالعه‌ای تجربی، تأثیر برخورد جت شعله مایل بر ویژگی‌های انتقال حرارت در مشعل‌های پیش‌مخلوط را بررسی کردند. این پژوهش نشان داد که نسبت هم‌ارزی استوکیومتری ( $\phi \approx 1$ ) توزیع بهینه عدد ناسلت را فراهم می‌کند و فاصله کمتر مشعل تا صفحه هدف، اثربخشی حرارتی بیشتری را به همراه دارد. همچنین، جان و همکاران [۱۲] با تحلیل تجربی و مدل‌سازی تحلیلی، پاسخ شعله‌های پیش‌مخلوط به اغتشاشات نسبت هم‌ارزی را بررسی کردند. آن‌ها با جداسازی مؤلفه‌های ناشی از نوسانات سرعت و نسبت هم‌ارزی در تابع انتقال شعله، نشان دادند که سطح شعله، سرعت شعله و گرمای واکنش نقش کلیدی در دینامیک آزادسازی حرارت دارند. مدل پیشنهادی آن‌ها که مبتنی بر معادله G بود، تطابق خوبی با داده‌های تجربی در شرایط عملکردی مختلف داشت.

روش‌های گوناگونی برای ارتقای عملکرد احتراقی و کاهش آلاینده‌ها پیشنهاد شده‌اند. از جمله می‌توان به پیش‌گرمایش سوخت و هوا، استفاده از افزودنی‌های شیمیایی، به‌کارگیری میدان‌های الکتریکی، و بهینه‌سازی هندسه نازل اشاره کرد [۱۳-۱۶]. در همین راستا، پورحسینی [۱۷] روشی ساده مبتنی بر تزریق ثانویه گاز طبیعی و ایجاد دوده میانی از طریق فرآیند پیرولیز پیشنهاد داد. در این روش، بخشی از سوخت اصلی به‌صورت مستقیم به درون شعله تزریق شد تا با تولید ذرات دوده‌ای با گسیلندگی بالا، انتقال حرارت تشعشعی بهبود یابد. در ادامه، جودت و همکاران در دو مطالعه‌ی تجربی جداگانه به بررسی تأثیر افزودن مواد مکمل به شعله گاز طبیعی پرداختند. در مطالعه نخست [۱۸]، اثر تزریق اتانول نبولایز شده بررسی شد که موجب بهبود اختلاط، افزایش ۳/۵ درصدی شار حرارتی و کاهش ۱۲/۵ درصدی در آلاینده NOx شد. در مطالعه دوم [۱۹]، نانوسیالی حاوی نانوذرات کربن با غلظت ۱۰۰۰ ppm از طریق نبولایزر به درون مشعل گازسوز تزریق شد. نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که با وجود کاهش جزئی دمای شعله، شار حرارتی تشعشعی تا ۵ درصد افزایش یافت، دمای گازهای دودکش حدود ۲ درجه کاهش پیدا کرد، و غلظت آلاینده‌های NOx و CO به ترتیب ۸ و ۹ میلی‌گرم بر کیلووات ساعت کاهش یافت. در مطالعه‌ای دیگر، ژیا و همکاران [۲۰] تأثیر میدان الکتریکی DC بر ساختار شعله آشفته بیوگاز را بررسی کردند. اعمال میدان الکتریکی منجر به تغییراتی در هندسه شعله و افزایش جزئی سرعت احتراق شد. همچنین، کاهش ارتفاع شعله و افزایش ضخامت شعله در مرکز

مشاهده شد، در حالی که ویژگی‌هایی چون انحنای سطح شعله تغییر محسوسی نداشتند. این نتایج نقش میدان الکتریکی در تغییر توزیع جریان و بهبود عملکرد شعله را در شرایط خاص نشان دادند.

ترکیب شیمیایی شعله و تولید رادیکال‌ها و یون‌های فعال نیز نقش اساسی در پایداری شعله و مسیرهای واکنشی دارد. بهینه‌سازی این پارامترها به‌ویژه در صنایع بزرگ که حتی ناکارآمدی جزئی منجر به اتلاف انرژی و انتشار گسترده گازهای گلخانه‌ای می‌شود، ضروری است [۲۱، ۲۲]. در این میان، طراحی سامانه‌های کنترلی لحظه‌ای<sup>۱</sup> برای پایش لحظه‌ای پارامترهای احتراقی به‌عنوان یکی از زمینه‌های پژوهشی نوظهور در حوزه مهندسی احتراق مطرح است [۲۳]. از جمله راهکارهای نوین در این زمینه، بهره‌گیری از میدان‌های الکتریکی خارجی جهت کنترل فعال فرآیند احتراق است که با تأثیر بر ترکیب یونی شعله، می‌تواند راندمان احتراق را بهبود داده و انتشار آلاینده‌ها را کاهش دهد. شناخت دقیق و کمی از شیمی یون‌ها در شعله، نقش کلیدی در توسعه مدل‌های پیش‌بینی‌کننده و طراحی این سامانه‌های کنترلی ایفا می‌کند [۲۴]. به‌عنوان نمونه، الکوایتی و همکاران [۲۵] با بهره‌گیری از طیف‌سنج جرمی پرتوی مولکولی، به اندازه‌گیری پروفایل غلظت یون‌ها در شعله‌های مسطح و اتمسفری متان-اکسیژن پرداختند و نشان دادند که استوکیومتری شعله تأثیر بسزایی بر توزیع مکانی یون‌ها دارد. آن‌ها همچنین سه اصلاح کلیدی در مدل‌های شیمی یونی پیشنهاد کردند که موجب بهبود انطباق میان نتایج عددی و تجربی شد. نتایج این پژوهش می‌تواند در توسعه مدل‌های دقیق‌تر شیمی یونی شعله و کنترل فعال احتراق از طریق میدان‌های الکتریکی مؤثر واقع شود.

با وجود اهمیت بالای موضوع، محدودیت‌هایی مانند هزینه بالای تجهیزات کنترلی، عدم وجود زیرساخت‌های مناسب در برخی صنایع، و عدم در دسترس بودن پایش لحظه‌ای باعث شده‌اند تا تنظیم نسبت سوخت به هوا به‌صورت دقیق در بسیاری از کاربردهای صنعتی امکان‌پذیر نباشد. این ناکارآمدی می‌تواند منجر به هدررفت گسترده گاز طبیعی و افزایش انتشار آلاینده‌ها شود [۲۶، ۲۷].

در چنین شرایطی، استفاده از روش‌های هوشمند و فرآیندکاری به‌ویژه در چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه<sup>۲</sup> اهمیت دوچندان می‌یابد. الگوریتم ژنتیک<sup>۳</sup>، به‌عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های فرآیندکاری، در مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی و پیچیده مانند احتراق گاز طبیعی اثربخشی قابل توجهی نشان داده است [۲۸-۳۰]. الگوریتم ژنتیک با الهام از فرآیند انتخاب طبیعی داروینی، قادر است فضای جستجوی گسترده و چندبعدی را کاوش کرده و راه‌حلی با دقت مناسب در شرایط غیرقطعی ارائه دهد و می‌تواند نسبت بهینه هم‌ارزی را با توجه به معیارهای چندگانه مانند بیشینه‌سازی راندمان، کاهش CO و کنترل NOx، استخراج کند [۳۱، ۳۲].

در سال‌های اخیر، تلفیق داده‌های تجربی با الگوریتم‌های هوشمند مانند GA<sup>۴</sup>، NSGA-II<sup>۴</sup> و PSO<sup>۵</sup> به‌عنوان رویکردی نوین در حل مسائل بهینه‌سازی مشعل‌ها در مقالات متعددی بررسی شده است [۳۳]. در مطالعه‌ای توسط رئوم‌شوسل و همکاران [۳۴]، یک روش داده‌محور مبتنی بر مدل‌های جایگزین احتمالاتی برای بهینه‌سازی طراحی مشعل توربین گازی با هدف کاهش انتشار NOx، جلوگیری از خاموشی شعله lean و کنترل نوسانات ترموآکوستیک پیشنهاد شد؛ نتایج نشان داد که با تنها چند نقطه داده تجربی، می‌توان طراحی بهینه چندهدفه را به‌طور مؤثری انجام داد. در مطالعه‌ای توسط ژیاو و همکاران [۳۵]، با ترکیب مدل پاسخ سطح و الگوریتم PSO، عملکرد احتراق شعله غیرپیش‌مخلوط متان-هیدروژن بهینه‌سازی شد. نتایج نشان داد نسبت اختلاط هیدروژن دارای بیشترین تأثیر را بر کاهش آلاینده‌های NO و CO<sub>2</sub> دارد و مدل پیش‌بینی ارائه شده با دقت بالا در ارزیابی و بهینه‌سازی شرایط عملکردی است. لن و همکاران [۳۶] با هدف بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش آلاینده‌ها، تأثیر افزودن

<sup>1</sup> Real-Time Control Systems

<sup>2</sup> Multi-objective Optimization

<sup>3</sup> Genetic Algorithm(GA)

<sup>4</sup> Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

<sup>5</sup> Particle Swarm Optimization

هیدروژن به گاز طبیعی را در یک کوره صنعتی بررسی کردند. آن‌ها با ترکیب داده‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی، دو مدل احتراقی مختلف را مقایسه کردند و نشان دادند که مدل احتراق غیرپیش‌مخلوط تطابق بیشتری با داده‌های تجربی دارد. این پژوهش نشان داد که انتخاب مدل احتراقی مناسب در ارزیابی اثرات سوخت‌های ترکیبی از اهمیت بالایی برخوردار است. در پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از داده‌های تجربی استخراج‌شده از آزمایش‌های صورت‌گرفته روی یک مشعل گازی نصب‌شده بر روی دیگ فولادی، و ترکیب آن با الگوریتم ژنتیک، نسبت هم‌ارزی بهینه استخراج شده است. هدف از این مطالعه، دستیابی به نقطه عملکردی است که ضمن بیشینه‌سازی راندمان حرارتی، غلظت آلاینده‌های خروجی نظیر CO و NOx نیز در محدوده مجاز باقی بمانند. یافته‌های این پژوهش می‌توانند مبنایی برای توسعه سامانه‌های احتراقی هوشمند و سازگار با الزامات محیط‌زیستی در صنایع حرارتی فراهم آورند.

### شرح دستگاه و روش انجام آزمایش

آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی با استفاده از یک مشعل گازی با حداکثر ظرفیت حرارتی ۱۲۰ کیلووات، نصب‌شده بر روی یک دیگ فولادی صنعتی سه‌پاس فایرتیوب به طول ۱۴۰۰ میلی‌متر و قطر ۹۰۰ میلی‌متر، انجام شده است. در بخش ورودی محفظه احتراق، محل نصب مشعل گزسوز و در خروجی، محل اتصال دودکش تعبیه شده است. برای خروج محصولات احتراق، از دودکشی به قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۹ متر استفاده شده است. دودکش مذکور یک متر بالاتر از موانع پیرامونی نصب شده و داده‌های ثبت‌شده توسط دستگاه گاز آنالایزر، پایداری شرایط و عدم تأثیر بادهای منطقه‌ای بر نتایج اندازه‌گیری را تأیید می‌نماید. دبی جریان گاز ورودی به مشعل توسط یک کنتور گاز با دقت ۱ لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. به منظور تثبیت دمای آب ورودی به دیگ، از دو دستگاه یونیت هیتر به همراه پمپ استفاده شده است. برای اندازه‌گیری دبی آب عبوری از دیگ، روماتر با بدنه فلزی مدل ACA01 و برای اندازه‌گیری دبی حجمی هوای ورودی به مشعل، از یک دبی-سرعت‌سنج دیجیتال کالیبره‌شده مدل TES-1340 Hot-Wire Anemometer بهره گرفته شده است. این تجهیزات در یک بستر آزمایشگاهی کامل و پایدار نصب و راه‌اندازی شده‌اند که در شکل ۱ نمایش داده شده است.





Figure 1 – The experimental setup used in this study  
 شکل ۱- بستر آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش

به منظور اندازه‌گیری دما ۱۲ عدد دریچه بازدید به قطر ۵ سانتی‌متر و با زاویه ۴۵ درجه نسبت به محور افق، در بدنه دیگ تعبیه شده است. برای اندازه‌گیری دمای بالای هسته شعله (تا ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) از ترموکوپل نوع S به دلیل دقت بالا، پایداری عالی و تحمل حرارتی مطلوب بهره گرفته شد. از سوی دیگر، برای پایش دمای گازهای خروجی در طول محفظه احتراق و دودکش (که دماهای پایین‌تری دارند و امکان جابجایی سنسور وجود دارد) از ترموکوپل نوع K استفاده شد که ضمن پوشش مناسب محدوده دمایی تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، از استحکام مکانیکی و هزینه اقتصادی مناسب‌تری برخوردار است. این انتخاب بهینه، امکان اندازه‌گیری دقیق و مطمئن را در هر دو ناحیه فراهم کرد. برای اندازه‌گیری دمای آب ورودی و خروجی به دیگ از سنسورهای مقاوم‌تی نوع PT-100 بهره گرفته شد. در شکل ۲ محل قرارگیری سنسورهای دما و موقعیت دریچه‌های بازدید تعبیه شده در بدنه دیگ نشان داده شده است.

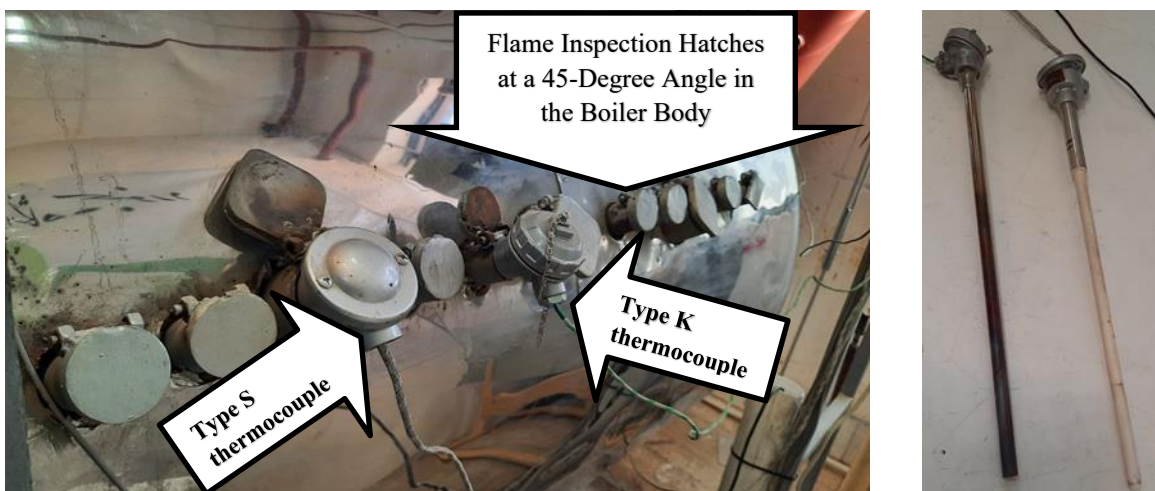


Figure 2- Positions of Type S and Type K thermocouples in the 45-degree valves of the combustion chamber on the test bed  
 شکل ۲- محل قرارگیری ترموکوپل‌های نوع S و K در دریچه‌های ۴۵ درجه بازدید محفظه احتراق

برای اندازه‌گیری دمای گازهای خروجی و درصد حجمی آلاینده‌های CO و NOx در گازهای حاصل از احتراق در دودکش، از دستگاه آنالیزور گاز مدل TESTO350 استفاده شده است. این آنالیزور قابلیت سنجش همزمان چندین پارامتر آلاینده را با دقت بالا دارد و در پایش لحظه‌ای عملکرد احتراقی نقش بسزایی ایفا می‌کند. دستگاه گاز آنالایزر Testo 350 به کار گرفته شده در این پژوهش مجهز به شش سنسور برای اندازه‌گیری همزمان گازهای O<sub>2</sub>، CO (با جبران اثر H<sub>2</sub>)، NO، NO<sub>2</sub>، SO<sub>2</sub> و CO<sub>2</sub> (با سنسور NDIR) است. این دستگاه با بهره‌گیری از یک سیستم پیشرفته نمونه‌برداری و آماده‌سازی گاز، خطای ناشی از انتقال گازهای داغ و مرطوب احتراق را به حداقل می‌رساند. در این سیستم، گازهای خروجی ابتدا توسط یک کندانسور پلتیر<sup>۱</sup> به سرعت سرد و خشک شده و ذرات آن پیش از ورود به سنسورها جدا می‌شوند. همچنین پروب نمونه‌برداری مورد استفاده قادر به تحمل دمای تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده در حالی که خود دستگاه در محدوده دمایی ۵- تا ۴۵+ درجه سانتی‌گراد عمل می‌کند. این مکانیزم اطمینان می‌دهد که داده‌های اندازه‌گیری شده بازتاب دقیقی از شرایط احتراق بوده و عاری از خطاهای ناشی از رطوبت یا دمای بالا هستند. در شکل ۳ دستگاه آنالیزور گاز مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است.



Figure 3 TESTO 350 gas analyzer  
شکل ۳- دستگاه آنالیزور گاز TESTO350

با توجه به اهمیت دقت اندازه‌گیری در اعتبار نتایج، مشخصات و دقت تجهیزات به‌کاررفته در آزمایش‌ها در جدول ۱ فهرست شده‌اند.

<sup>۱</sup> Peltier Cooler

جدول ۱- مشخصات و دقت تجهیزات اندازه‌گیری مورد استفاده در آزمایش‌ها

Table 1- Specifications and Accuracy of Equipment Used in the Experiments

No.	Equipment	Model	Accuracy	Measured parameter
1	Natural Gas Flowmeter	Counter	$\pm 1\text{L/s}$	Volumetric flow rate of natural gas entering the burner
2	Combustion Air Anemometer	TES-1340 (Hot-Wire Anemometer)	$\pm 3\%$	Velocity and volumetric flow rate of air entering the burner
3	Water Flow Meter	ACA01 (Metal tube rotameter)	$\pm 0.1\text{L/min}$	Volumetric flow rate of water passing through the boiler
4	Flame Temperature Thermocouple	Type S thermocouple with Ceramic Sheath	$\pm 1^\circ\text{C}$	Flame temperature inside the combustion chamber
5	Flue Gas Temperature Thermocouple	Type K thermocouple	$\pm 1.5^\circ\text{C}$	Flue gas temperature at the chimney outlet
6	Inlet/Outlet Water Temperature Sensor	PT-100	$\pm 0.1^\circ\text{C}$	Inlet and outlet water temperatures of the boiler
7	Gas Analyzer	Testo 350	$\pm 5\%$ of measured value	Measurement of the volumetric concentrations of $\text{O}_2$ , $\text{CO}$ , $\text{NO}$ , and $\text{NO}_2$ in the flue gases

رویه انجام آزمایش و بررسی نسبت هم ارزی بر غلظت آلاینده‌ها و راندمان مشعل به این ترتیب بوده است که ابتدا گاز از طریق مشعل وارد محفظه احتراق شده و هوای اضافه نیز توسط فن داخل مشعل، که دور آن به وسیله یک اینورتر کنترل می‌شود، با حداکثر مقدار وارد محفظه احتراق می‌شود. در مرحله بعد با تغییر تدریجی فرکانس اینورتر، دور فن و در نتیجه حجم هوای ورودی به مشعل نیز کاهش می‌یابد.

پس از رسیدن سیستم به شرایط پایدار در هر مرحله، تمامی داده‌ها شامل دمای ورودی و خروجی به بویلر، دبی جریان هوای عبوری از بویلر، دمای هوای ورودی به مشعل، دبی گاز مصرفی، دمای شعله در فواصل مختلف از مشعل و همچنین غلظت گازهای  $\text{O}_2$ ،  $\text{CO}_2$ ،  $\text{CO}$ ،  $\text{NO}$ ،  $\text{NO}_2$  و سایر ترکیبات آلاینده‌های خروجی از دودکش ثبت می‌شود. برای اطمینان از پایداری شرایط احتراق و رسیدن به تثبیت حرارتی کامل پس از هر تغییر در فرکانس دمنده، بازه زمانی ۳۰ تا ۴۵ دقیقه جهت رسیدن به وضعیت پایدار در نظر گرفته شده است. این بازه زمانی نه تنها برای تثبیت شرایط احتراق (جریان گاز، هوا، و شیمی شعله)، بلکه به طور خاص برای اطمینان از اینکه ترموکوپل‌ها به تعادل حرارتی با محیط جدید رسیده‌اند، در نظر گرفته شد. در ادامه، نسبت هم‌ارزی سوخت به هوا با تغییر فرکانس دمنده مجدداً تغییر یافته و پس از رسیدن به شرایط پایدار جدید، تمامی داده‌ها مجدداً اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند. این فرایند در چندین مرحله و برای بازه‌ای از نسبت‌های هم‌ارزی صورت گرفته است تا تحلیل دقیق‌تری از رفتار سامانه در شرایط مختلف صورت پذیرد. به منظور اعتبارسنجی داده‌های به دست آمده، آزمایش‌ها در دو نوبت تکرار شده‌اند و عدم قطعیت توسعه‌یافته ناشی از دقت تجهیزات‌گیری و تکرار آزمایش با سطح اطمینان ۹۵ درصد محاسبه و در نمودارهای مربوطه گزارش شده است. در شکل ۴ طرح‌واره کامل بستر آزمایش مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است در این شکل محل نصب سنسورهای دما و دستگاه گاز آنالایزر نشان داده شده است همچنین مسیر حرکت گازهای حاصل از احتراق با فلش‌های به رنگ قرمز مشخص شده است. این فرآیند به تضمین دقت و تکرارپذیری نتایج کمک می‌کند و امکان بهینه‌سازی دقیق‌تر سیستم احتراق را فراهم می‌آورد.

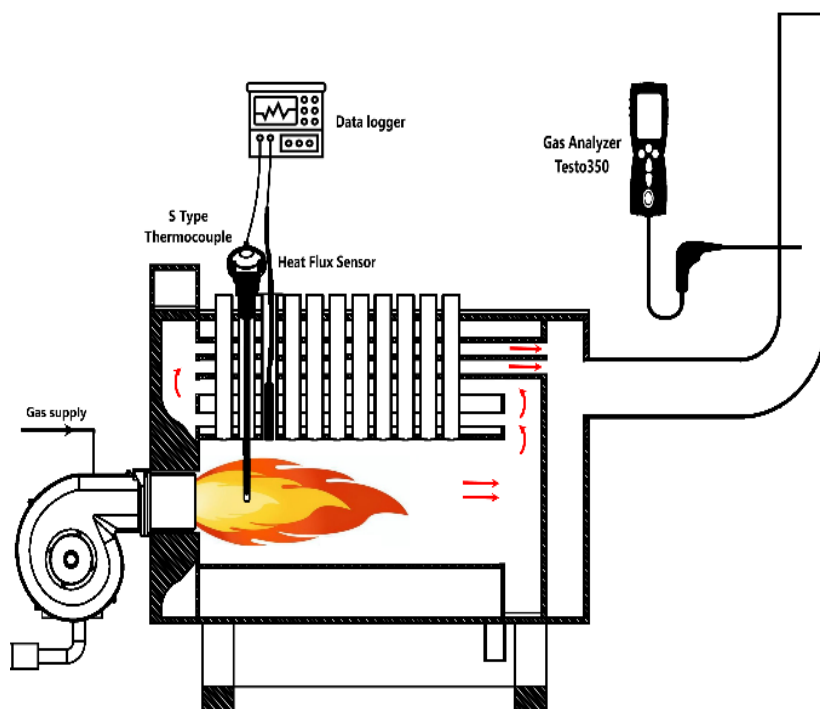


Figure 4- Schematic of the experimental setup used in this research  
 شکل ۴- طرح‌واره بستر آزمایش مورد استفاده در پژوهش

در این پژوهش با توجه به قوانین اول و دوم ترمودینامیک، بازده مستقیم بویلر از طریق رابطه (۱) محاسبه شود [۳۷]:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{absorb} - T_0 \dot{Q}_{absorb} \left( \frac{1}{T_{ave.Water}} - \frac{1}{T_{ave.flame}} \right)}{\dot{Q}_{in}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $T_0$  دمای محیط،  $\dot{Q}_{in}$  ارزش حرارتی گاز طبیعی محل آزمایش،  $T_{ave.Water}$  و  $T_{ave.flame}$  به ترتیب دمای میانگین آب و دمای میانگین شعله،  $\dot{Q}_{absorb}$  انرژی حرارتی جذب شده توسط آب در گردش است که با توجه به اختلاف دمای آب ورودی و خروجی بویلر و دبی آب گردش یافته در شرایط پایدار محاسبه می‌شود.

## نتایج

در این بخش، با تکیه بر داده‌های اندازه‌گیری‌شده، به تجزیه و تحلیل تغییرات دمای شعله در مواجهه با نسبت‌های مختلف هم‌ارزی پرداخته می‌شود. به‌منظور افزایش دقت در تحلیل داده‌ها، شرایط مرزی و پارامترهای کنترلی به‌طور کامل پایش و ثابت نگه‌داشته شده‌اند تا تأثیر سایر عوامل کاهش یابد. برای اطمینان از صحت نتایج به دست آمده، آزمایش‌ها در دو نوبت تکرار شده و مقدار میانگین آن‌ها به‌عنوان داده نهایی در نظر گرفته شده است. همچنین، عدم قطعیت توسعه یافته ناشی از دقت تجهیزات اندازه‌گیری و تکرار آزمایش با سطح اطمینان ۹۵ درصد محاسبه و در نمودارهای مربوطه نشان داده شده است. شکل ۵ نمودار تغییرات دمای شعله را بر حسب نسبت هم‌ارزی نشان می‌دهد. مطابق با نتایج حاصل از آزمایش‌ها، با افزایش نسبت هم‌ارزی از مقدار ۰/۵۵ تا ۰/۸۳، روندی صعودی در دمای شعله مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که دما از حدود ۹۵۰ کلوین به بیشینه مقدار خود، یعنی تقریباً ۱۱۰۰ کلوین، افزایش می‌یابد. این افزایش عمدتاً به دلیل فرآیند احتراق در نسبت‌های سوخت به هوای غنی‌تر اتفاق می‌افتد. به بیان دیگر، افزایش سوخت در مخلوط باعث فراهم شدن انرژی شیمیایی بیشتر و در نتیجه

افزایش نرخ واکنش‌های احتراقی می‌شود که منجر به تولید حرارت بیشتر و در پی آن، افزایش دمای شعله می‌شود. افزایش دمای شعله در این بازه، به‌عنوان نشانه‌ای از کارکرد بهینه مشعل در شرایط غنی کنترل شده، قابل تفسیر است. با این حال، ادامه‌ی افزایش نسبت هم‌ارزی فراتر از مقدار بهینه‌ی ۰/۸۳، منجر به کاهش مجدد دمای شعله می‌شود. این افت دما ناشی از کاهش میزان اکسیژن موجود در مخلوط‌های بسیار غنی است، که در نتیجه آن فرآیند احتراق با راندمان پایین‌تری انجام شده و احتراق ناقص رخ می‌دهد. در چنین شرایطی، تولید حرارت به‌صورت مؤثر کاهش یافته و بخشی از سوخت بدون سوختن کامل باقی می‌ماند، که این امر افت محسوس در دمای شعله را به دنبال دارد. این کاهش نشان می‌دهد که افزایش بیش از حد سوخت نه تنها بازدهی را بالا نمی‌برد، بلکه می‌تواند موجب عملکرد نامطلوب سامانه شود. این رفتار نشان‌دهنده وجود یک نقطه‌ی بهینه در نسبت هم‌ارزی برای حداکثر بازده حرارتی سامانه احتراقی مورد بررسی است.

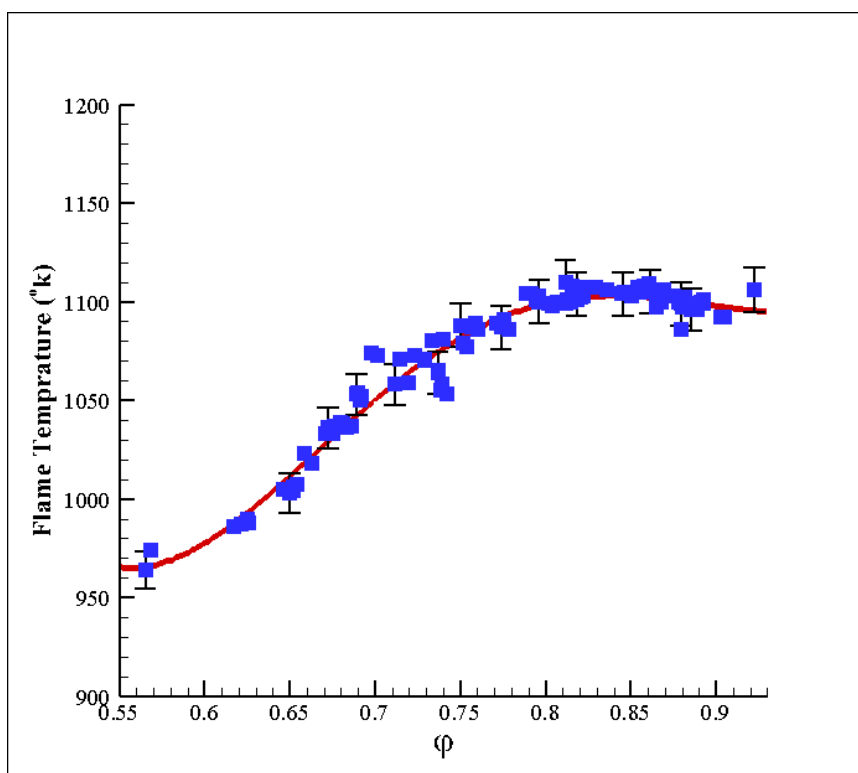


Figure 5- Variation of flame temperature with equivalence ratio

شکل ۵- تغییرات دمای شعله بر حسب نسبت هم‌ارزی

شکل ۶ تغییرات مربوط به میزان انتشار آلاینده‌های نیتروژن را به‌عنوان تابعی از نسبت هم‌ارزی نمایش می‌دهد. داده‌های تجربی به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش نسبت هم‌ارزی از مقدار ۰/۵۵ تا ۰/۸۳، میزان انتشار NOx روندی افزایشی داشته و در نسبت هم‌ارزی ۰/۸۳ به بیشینه مقدار خود می‌رسد. در ادامه، با افزایش بیشتر نسبت هم‌ارزی فراتر از این نقطه، میزان آلاینده NOx کاهش می‌یابد و شیب افت آن در ناحیه غنی‌تر محسوس‌تر می‌شود. این رفتار غیرخطی نشان می‌دهد که تولید NOx تابعی قوی از شرایط احتراقی است و نمی‌توان آن را صرفاً به افزایش سوخت نسبت داد. برای تبیین کیفی این رفتار، لازم است به مکانیزم غالب تشکیل NOx در احتراق گاز طبیعی اشاره شود. از آنجا که گاز طبیعی اساساً ترکیبات نیتروژن‌دار ندارد، سهم تشکیل NOx ناشی از نیتروژن موجود در سوخت ناچیز است. بنابراین، در این

نوع سوخت، مکانیزم حرارتی زلدویچ<sup>۱</sup> به عنوان مکانیزم اصلی تولید NOx شناخته می‌شود. این فرآیند شامل شکسته شدن مولکول‌های نیتروژن موجود در هوای ورودی در دماهای بالا و واکنش آن‌ها با رادیکال‌های فعال مانند اکسیژن اتمی (O) و هیدروکسیل (OH) است که در ناحیه شعله با غلظت بالا حضور دارند.

شدت واکنش‌های تشکیل NOx حرارتی به صورت نمایی به دمای احتراق وابسته است. به عبارت دیگر، افزایش دمای شعله به صورت مستقیم منجر به تشدید واکنش‌های NOx و در نتیجه افزایش غلظت این آلاینده در گازهای خروجی می‌شود. از آنجا که با افزایش نسبت هم‌ارزی از ۰/۵۵ تا ۰/۸۳ دمای شعله نیز افزایش می‌یابد (شکل ۵)، افزایش NOx در این بازه کاملاً قابل انتظار است.

در نسبت‌های هم‌ارزی بالاتر از ۰/۸۳، با کاهش محتوای اکسیژن در مخلوط احتراقی و شکل‌گیری احتراق ناقص، دمای شعله افت کرده و شرایط برای تشکیل NOx حرارتی نامناسب می‌شود؛ بنابراین، غلظت NOx کاهش می‌یابد. افزون بر دما، فشار و زمان ماند نیز از عوامل تأثیرگذار در مکانیزم حرارتی هستند؛ به طوری که کاهش هر یک از این سه پارامتر می‌تواند به کاهش تولید NOx منجر شود. از آنجا که تأثیر دما بر تولید NOx از نوع نمایی است، کاهش دمای احتراق یکی از راهکارهای اصلی در فناوری‌های نوین برای کنترل انتشار NOx به شمار می‌رود. در طراحی مشعل‌های کم‌آلاینده<sup>۲</sup> نیز از این ویژگی بهره گرفته می‌شود تا با کنترل دقیق شرایط حرارتی و زمان ماند، تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی به حداقل برسد.

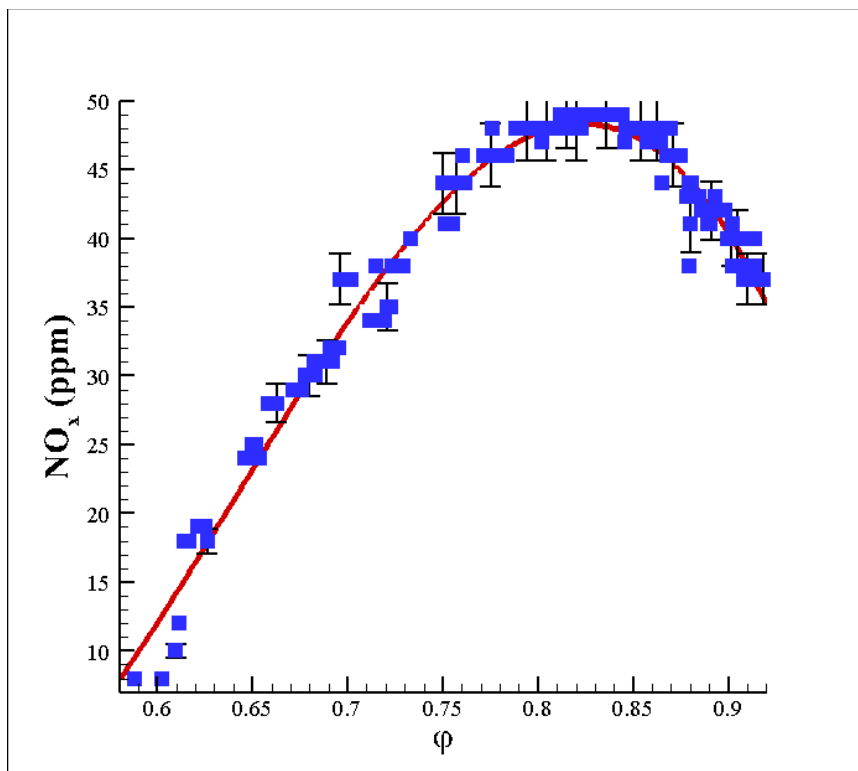


Figure 6- Variation of NOx emissions with equivalence ratio

شکل ۶- تغییرات آلاینده ناکس بر حسب نسبت هم‌ارزی

<sup>1</sup> Thermal Zeldovich Mechanism

<sup>2</sup> Low-NOx Burners

شکل ۷ روند تغییرات آلاینده مونوکسید کربن را برحسب نسبت هم‌ارزی نمایش می‌دهد. همان‌طور که از داده‌های تجربی مشاهده می‌شود، رفتار انتشار این آلاینده به‌طور مشخص تابعی از شرایط احتراق و ترکیب مخلوط سوخت و هواست. در بازه نسبت هم‌ارزی ۰/۸ تا ۰/۸۵، کمترین مقدار انتشار CO ثبت شده است. در این محدوده، شرایط احتراق به‌گونه‌ای است که از یک سو دمای شعله در سطح مناسبی حفظ می‌شود و از سوی دیگر میزان اکسیژن موجود برای تکمیل واکنش‌های سوخت کافی است. این وضعیت منجر به بهینه‌سازی تبدیل مونوکسید کربن (که حاصل احتراق ناقص است) به دی‌اکسید کربن (CO<sub>2</sub>) از طریق واکنش‌های اکسایش می‌شود.

با این حال، در نسبت‌های هم‌ارزی کمتر از ۰/۸۰، با وجود فراوانی اکسیژن، دمای شعله کاهش یافته و در نتیجه نرخ واکنش‌های اکسایش CO به CO<sub>2</sub> کاهش می‌یابد. این افت دما باعث کند شدن واکنش‌های ترمودینامیکی و سینتیکی مربوطه شده و نهایتاً موجب افزایش غلظت آلاینده CO در گازهای خروجی می‌شود. از سوی دیگر، در نسبت‌های هم‌ارزی بیش از ۰/۸۵، شرایط کاملاً معکوس است؛ یعنی با وجود حفظ نسبی دمای شعله، مقدار اکسیژن موجود برای کامل شدن واکنش‌های احتراق کافی نیست. این کمبود اکسیژن موجب ناتمام ماندن فرآیندهای احتراق و باقی ماندن CO به عنوان محصول جانبی احتراق ناقص می‌شود. در نتیجه، رفتار انتشار CO از هر دو سوی نسبت هم‌ارزی افزایش می‌یابد و تنها در بازه بهینه‌ای که توازن مناسبی بین دمای احتراق و محتوای اکسیژن برقرار است، به حداقل مقدار خود می‌رسد. این موضوع اهمیت تعیین نسبت هم‌ارزی بهینه را در طراحی مشعل‌ها و سیستم‌های احتراقی با آلایندگی پایین برجسته می‌سازد.

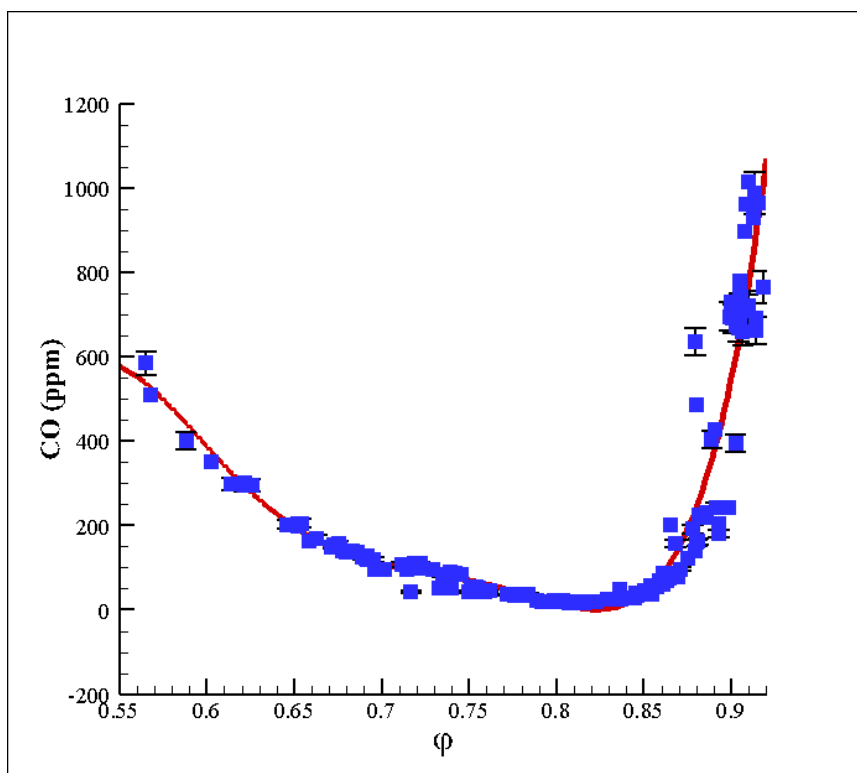


Figure 7- Variation of CO emissions with equivalence ratio  
شکل ۷- تغییرات آلاینده مونوکسید کربن بر حسب نسبت هم‌ارزی

شکل ۸ تغییرات راندمان خالص و ناخالص احتراق را به عنوان تابعی از نسبت هم‌ارزی  $\phi$  نمایش می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش نسبت هم‌ارزی از مقادیر زیر استوکیومتریک به سمت مقادیر نزدیک به یا کمی بالاتر از یک، هر دو شاخص راندمان (خالص و ناخالص) روند افزایشی نشان می‌دهند.

این افزایش راندمان عمدتاً به بهبود شرایط ترمودینامیکی و سینتیکی واکنش‌های احتراقی در مخلوط‌های غنی‌تر ( $\phi > 1$ ) بازمی‌شود. در این حالت، حضور میزان بیشتری از سوخت در ترکیب ورودی، منجر به افزایش دمای شعله و به تبع آن افزایش نرخ واکنش‌های اکسایش سوخت می‌شود. افزایش نرخ واکنش‌ها به معنای تبدیل مؤثرتر انرژی شیمیایی نهفته در سوخت به انرژی حرارتی مفید است، که در نهایت به ارتقاء راندمان احتراق منجر می‌شود. از سوی دیگر، در مخلوط‌های رقیق‌تر ( $\phi < 1$ )، اگرچه اکسیژن به میزان کافی یا حتی اضافی وجود دارد، اما دمای احتراق به دلیل رقیق‌شدن مخلوط کاهش یافته و بخشی از انرژی آزاد شده به صورت اتلاف حرارتی از طریق گازهای اضافه دفع می‌شود. این شرایط منجر به کاهش توان مؤثر تولیدی و افت راندمان می‌شود.

نکته مهم دیگر آن است که راندمان ناخالص، به دلیل در نظر گرفتن انرژی نهان تبخیر آب موجود در محصولات احتراق، همواره اندکی بیشتر از راندمان خالص محاسبه می‌شود. در مقابل، راندمان خالص با کسر انرژی صرف‌شده برای تبخیر، معیار دقیق‌تری برای ارزیابی توان واقعی قابل‌بازیابی از احتراق محسوب می‌شود. نتایج حاصل از آزمایش نشان می‌دهند که هر دو شاخص راندمان، در نسبت‌های هم‌ارزی نزدیک به شرایط استوکیومتریک ( $\phi \approx 1$ ) به مقادیر بیشینه خود نزدیک می‌شوند، که نشان‌دهنده بهینه‌ترین شرایط واکنش از منظر تبدیل انرژی است. بنابراین، انتخاب مناسب نسبت هم‌ارزی، نقش کلیدی در افزایش بازده سیستم‌های احتراقی ایفا می‌کند.

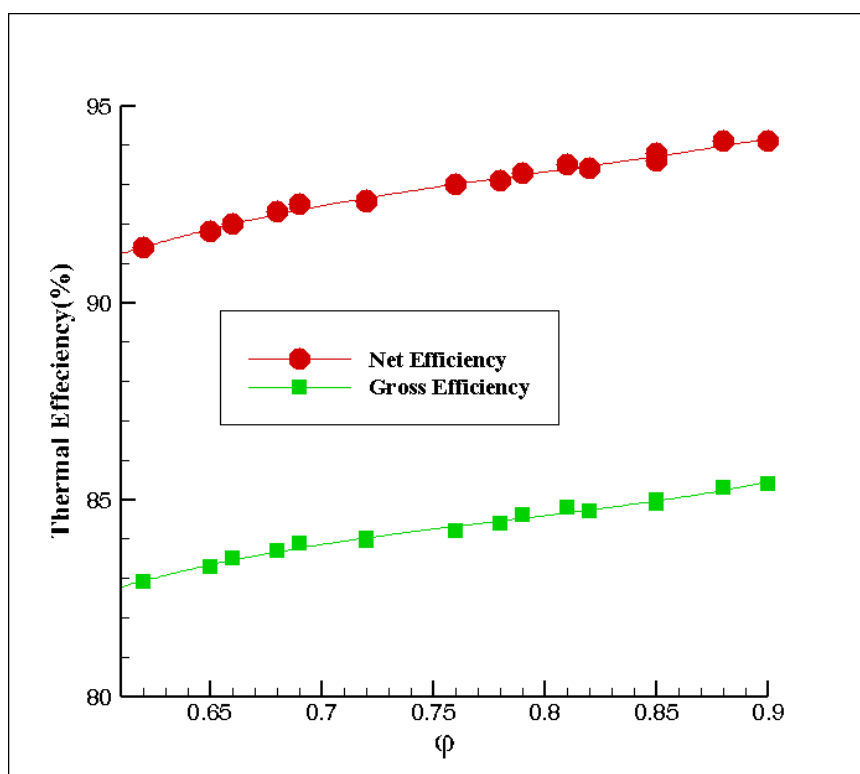


Figure 8- Variation of net and gross combustion efficiency with equivalence ratio  
شکل ۸- تغییرات راندمان خالص و ناخالص احتراق بر حسب نسبت هم‌ارزی

به منظور تعیین نسبت هم‌ارزی بهینه که در آن بیشترین بازدهی احتراق و کمترین میزان آلاینده‌ها حاصل شود، از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر در حوزه‌ی بهینه‌سازی فراابتکاری چندهدفه استفاده شد. از آنجا که واحد و دامنه تغییرات پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه (از جمله راندمان احتراق، دمای شعله، غلظت آلاینده مونوکسیدکربن و اکسیدهای نیتروژن) با یکدیگر متفاوت هستند، پیش از اعمال الگوریتم ژنتیک، کلیه داده‌ها به‌منظور ایجاد تعادل عددی در فرایند محاسبات، به‌صورت نرمال‌شده در بازه [۰, ۱] تبدیل شد. فرایند نرمال‌سازی از طریق تقسیم مقدار هر پارامتر بر بیشینه مقدار همان پارامتر در کل مجموعه داده‌ها انجام شد.

در ادامه، تابع هدف به‌گونه‌ای تعریف شد که بیشینه‌سازی راندمان احتراق به‌صورت هم‌زمان با کنترل مقادیر CO و NOx در محدوده‌های مجاز استاندارد مدنظر قرار گیرد و مقادیر خارج از محدوده از طریق اعمال تابع جریمه<sup>۱</sup> در برازندگی لحاظ شوند. فرایندهای اصلی الگوریتم ژنتیک نیز مطابق تنظیمات پیش‌فرض محیط نرم‌افزار متلب به شرح زیر در نظر گرفته شدند:

(۱) انتخاب<sup>۲</sup>: از نوع تصادفی یکنواخت<sup>۳</sup> به‌منظور افزایش احتمال گزینش افراد با برازندگی بالاتر همراه با حفظ تنوع جمعیت.

(۲) تقاطع<sup>۴</sup>: از نوع پراکنده برای ترکیب تصادفی ژن‌های والدین و کاوش وسیع‌تر فضای جستجو.

(۳) جهش<sup>۵</sup>: از نوع گاوسی<sup>۶</sup> برای جلوگیری از همگرایی زودرس و افزایش تنوع جمعیت.

(۴) شرط توقف<sup>۷</sup>: بر اساس رسیدن به حداکثر ۲۰۰ نسل یا ارضای شرط همگرایی زودتر.

نتایج بهینه‌سازی نشان داد که الگوریتم ژنتیک توانست نقطه‌ی بهینه‌ی نسبت هم‌ارزی را در مقدار  $\varphi \approx 0.83$  شناسایی کند؛ نقطه‌ای که در آن راندمان احتراق در بیشینه مقدار قابل دستیابی باقی مانده و در عین حال غلظت آلاینده‌های CO و NOx در محدوده استاندارد حفظ شدند. این امر نشان‌دهنده اثربخشی بالای الگوریتم‌های تکاملی هوشمند در حل مسائل چندهدفه در حوزه احتراق صنعتی است.

شکل ۹ تغییرات نرمال‌شده‌ی آلاینده‌های مونوکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن و دمای شعله را بر حسب نسبت هم‌ارزی  $\varphi$  نمایش می‌دهد. بر اساس این نتایج، اگرچه یک بازه مشخص از نسبت‌های هم‌ارزی وجود دارد که در آن راندمان احتراق به بیشینه مقدار خود و دمای شعله به مقدار مناسب می‌رسد، اما در همین بازه مقدار آلاینده مونوکسیدکربن از حد مجاز (۶۰ ppm) فراتر رفته و به‌عنوان عامل محدودکننده ایفای نقش می‌کند. در مقابل، مقدار NOx در تمامی نسبت‌های هم‌ارزی بررسی‌شده، در محدوده مجاز استاندارد (کمتر از ۸۰ ppm) باقی مانده و تهدیدی برای عملکرد زیست‌محیطی سیستم ایجاد نمی‌کند. بنابراین، برای تعیین نقطه بهینه نهایی با در نظر گرفتن هم‌زمان ملاحظات عملکردی و زیست‌محیطی، الگوریتم ژنتیک به‌گونه‌ای طراحی و اجرا شد که محدودیت اصلی به کنترل سطح آلاینده‌ی CO اختصاص یابد.

خروجی این فرایند بهینه‌سازی چندهدفه نشان داد که مقدار بهینه‌ی نسبت هم‌ارزی برابر با  $\varphi = 0.83$  است. در این نقطه، علاوه بر آنکه هر دو آلاینده CO و NOx در محدوده مجاز قرار دارند، راندمان احتراق نیز به بیشینه مقدار قابل دستیابی در شرایط مجاز رسیده است. این نتیجه مؤید اثربخشی بالای الگوریتم ژنتیک در حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده با چندین هدف متضاد و

<sup>1</sup> Penalty Function

<sup>2</sup> Selection

<sup>3</sup> Stochastic Uniform

<sup>4</sup> Crossover

<sup>5</sup> Mutation

<sup>6</sup> Gaussian Mutation

<sup>7</sup> Stopping Criteria

قیود عملکردی است، و نشان می‌دهد که انتخاب صحیح نسبت هم‌ارزی نقش کلیدی در دستیابی به عملکرد بهینه مشعل ایفا می‌کند.

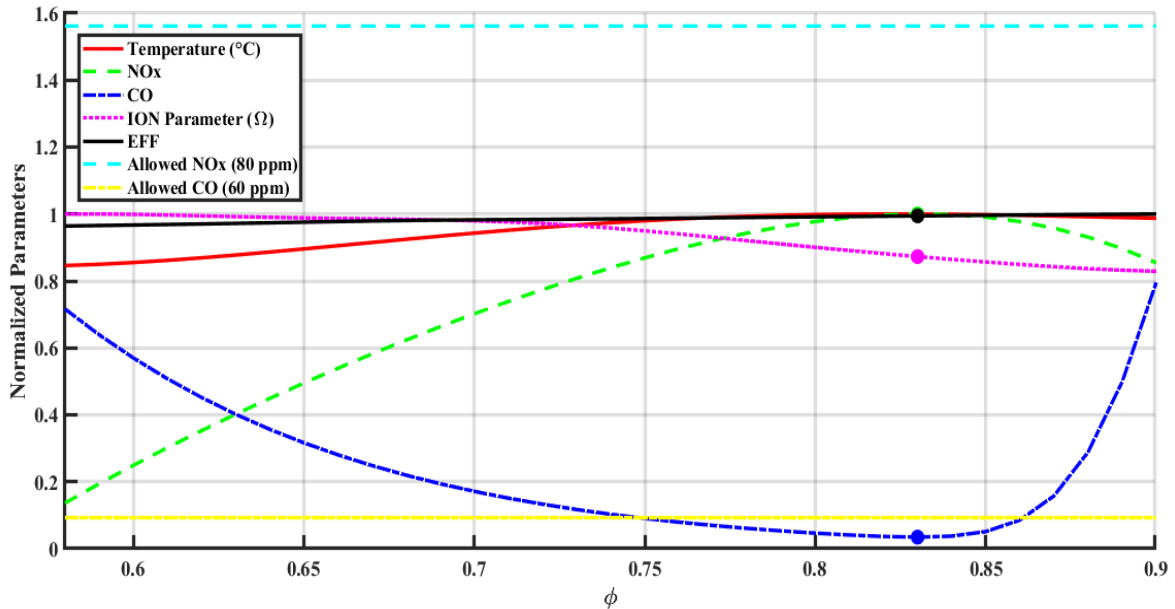


Figure 9- Normalized variation of CO, NOx, and flame temperature with equivalence ratio  
 شکل ۹- تغییرات نرمال شده پارامترهای CO، NOx و دمای شعله بر حسب نسبت هم‌ارزی

### نتیجه‌گیری

بهبود بازده و عملکرد حرارتی مشعل‌های گازسوز صنعتی در صنایعی چون سیمان، ذوب فلزات، سرامیک، نیروگاه‌ها و صنایع غذایی اهمیت زیادی دارد. در این میان، تنظیم دقیق نسبت هوا به سوخت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل افزایش بازدهی احتراق و کاهش آلاینده‌ها شناخته می‌شود. روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری، به‌ویژه الگوریتم ژنتیک، طی سال‌های اخیر جایگاه برجسته‌ای در حل مسائل پیچیده مهندسی احتراق یافته‌اند.

در این پژوهش، از الگوریتم ژنتیک برای تعیین نسبت هم‌ارزی بهینه در یک مشعل گازی نصب‌شده بر دیگ فولادی با ظرفیت ۱۰۰,۰۰۰ کیلوکالری بر ساعت استفاده شد. پارامترهایی مانند دمای شعله و غلظت آلاینده‌های CO و NOx با حسگرهای دقیق اندازه‌گیری و تمامی آزمایش‌ها دوبار تکرار شد. همچنین عدم قطعیت توسعه‌یافته بر اساس اصول آماری محاسبه شد تا اعتبار نتایج تضمین شود.

یافته‌ها نشان داد دمای شعله با افزایش نسبت هم‌ارزی از ۰/۵۵ تا ۰/۸۳ به‌طور پیوسته رشد کرده و در  $\phi = 0.83$  به حدود ۱۱۰۰ کلوین و بیشترین بازده رسید. در نسبت‌های بالاتر، کاهش اکسیژن سبب افت دما و بازده شد. بررسی آلاینده‌ها حاکی از آن بود که NOx مطابق مکانیزم زدویچ با افزایش دما رشد کرده و در  $\phi = 0.83$  بیشینه شد، اما همچنان در محدوده مجاز (کمتر از ۸۰ ppm) باقی ماند. در مقابل، رفتار CO غیرخطی داشت و تنها در بازه ۰/۸ تا ۰/۸۵ به حداقل رسید؛ خارج از این بازه به دلیل احتراق ناقص یا کاهش دما افزایش یافته و گاه از ۸۰ ppm فراتر رفت، به‌طوری‌که CO عامل محدودکننده تعیین نسبت بهینه شد. برای تحلیل همزمان بازده و آلاینده‌ها، داده‌ها نرمال‌سازی و الگوریتم ژنتیک اجرا شد. نتایج نشان داد  $\phi = 0.83$  بهترین تعادل میان بازده و حداقل آلاینده‌ها را فراهم می‌آورد.

در مجموع، به کارگیری الگوریتم‌های هوشمند در تنظیم نسبت هوا به سوخت می‌تواند رویکردی عملی برای ارتقای کارایی و کاهش آلاینده‌ها در مشعل‌های صنعتی باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی اثر انواع سوخت و مشعل، شرایط محیطی و توسعه سامانه‌های پایش و کنترل هوشمند در زمان واقعی بررسی شود تا راهکارهای مؤثرتری برای احتراق پاک و بهینه ارائه شود.

## تشکر و قدردانی

این پروژه در آزمایشگاه پژوهشی احتراق دانشگاه بجنورد انجام شده است و نویسندگان قدردانی خود را از دانشگاه بجنورد و شرکت دانش بنیان توسعه فناوری دانشگاه بجنورد اعلام می‌دارند.

## منابع

- [1] R. F. Aguilera, R. G. Eggert, L. C. Gustavo, and J. E. Tilton, "Depletion and the future availability of petroleum resources," *The Energy Journal*, vol. 30, no. 1, pp. 141-174, 2009.
- [2] M. J. Economides and D. A. Wood, "The state of natural gas," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 1, no. 1-2, pp. 1-13, 2009.
- [3] M. Mayrhofer, M. Koller, P. Seemann, R. Prieler, and C. Hochenauer, "Assessment of natural gas/hydrogen blends as an alternative fuel for industrial heat treatment furnaces," *International journal of hydrogen energy*, vol. 46, no. 41, pp. 21672-21686, 2021.
- [4] L. Wei and P. Geng, "A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance," *Fuel Processing Technology*, vol. 142, pp. 264-278, 2016.
- [5] Q. Xu *et al.*, "Effects of optimized operating parameters on combustion characteristics and NO<sub>x</sub> emissions of a burner based on orthogonal analysis," *Journal of Thermal Science*, vol. 30, no. 4, pp. 1212-1223, 2021.
- [6] X. Liu and R. Bansal, "Optimizing combustion process by adaptive tuning technology based on Integrated Genetic Algorithm and Computational Fluid Dynamics," *Energy conversion and management*, vol. 56, pp. 53-62, 2012.
- [7] T. Bullard, A. Steinbrenner, P. Stuttaford, D. Jansen, and T. De Bruijne, "Improvement of premixed gas turbine combustion system fuel flexibility with increased hydrogen consumption in a renewable market place," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 2018, vol. 51050, p. V04AT04A039: American Society of Mechanical Engineers.
- [8] R. G. Newell and D. Raimi, "Implications of shale gas development for climate change," *Environmental science & technology*, vol. 48, no. 15, pp. 8360-8368, 2014.
- [9] H. Chu, L. Xiang, S. Meng, W. Dong, M. Gu, and Z. Li, "Effects of N<sub>2</sub> dilution on laminar burning velocity, combustion characteristics and NO<sub>x</sub> emissions of rich CH<sub>4</sub>-air premixed flames," *Fuel*, vol. 284, p. 119017, 2021.
- [10] F. Hu, P. Li, J. Guo, K. Wang, C. Gong, and Z. Liu, "New dependence of NO emissions on the equivalence ratio in moderate or intense low-oxygen dilution combustion," *Energy & Fuels*, vol. 32, no. 12, pp. 12905-12918, 2018.
- [11] P. Kuntikana and S. Prabhu, "Heat transfer characteristics of premixed methane-air flame jet impinging obliquely onto a flat surface," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 101, pp. 133-146, 2016.
- [12] T. John, N. Magina, F. Han, J. Kaufmann, M. Vogel, and T. Sattelmayer, "Equivalence Ratio-Driven Flame Response of an Industrial Premixed Burner: Experiments and Modeling," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 147, no. 4, p. 041025, 2025.
- [13] A. Atreya, "Highly preheated combustion Air system with/without oxygen enrichment for metal processing furnaces," Final Technical Report for DEFC36-02ID14348, The University of Michigan 2006.
- [14] A. Jodat, M. Najafian, and A. Mohammadi, "Experimental study of injecting water vapor and oil compounds by nebulizer on the efficiency and natural gas flame pollution," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 53, no. 1, pp. 31-40, 2021.
- [15] D. Hu, L. Xu, Z. Cao, S. Sun, and J. Sun, "Verification for electrical tomography in flame monitoring by ion probe," in *2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2019, pp. 1-6: IEEE.
- [16] B. Ganguly, "Hydrocarbon combustion enhancement by applied electric field and plasma kinetics," *Plasma Physics and Controlled Fusion*, vol. 49, no. 12B, p. B239, 2007.
- [17] S. Pourhoseini, "A novel configuration of natural gas diffusion burners to enhance optical, thermal and radiative characteristics of flame and reduce NO<sub>x</sub> emission," *Energy*, vol. 132, pp. 41-48, 2017.
- [18] A. Jodat, A. Kameli, M. Najafian, and O. Mahian, "Experimental study of nebulized ethanol injection in radiative heat transfer and NO<sub>x</sub> pollutant of natural gas flame," *Fuel and Combustion*, vol. 16, no. 4, pp. 16-27, 2024.
- [19] A. Jodat, M. Najafian, and O. Mahian, "Enhancing Gas Burner Efficiency and Reducing Exhaust Emissions: An Experimental Study on the Use of Nebulized Carbon Nanoparticles," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, vol. 49, no. 2, pp. 709-722, 2025.

- [20] H. Xia, J. Wang, R. Ju, Y. Li, H. Mu, and Z. Huang, "Effect of ionic wind induced by DC electric field on biogas/air turbulent premixed flame structure," *Combustion Science and Technology*, vol. 195, no. 2, pp. 294-312, 2023.
- [21] J. C. Wollgarten, N. Zarzalis, F. Turrini, and A. Peschiulli, "Ion current measurements as a method for the detection of the reaction rate in combustion with swirl stabilized airblast injection systems," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 2015, vol. 56758, p. V006T05A006: American Society of Mechanical Engineers.
- [22] H. Xu, W. Fan, J. Feng, P. Yan, S. Qi, and R. Zhang, "Parameter Determination and ion current Improvement of the ion current sensor used for flame monitoring," *Sensors*, vol. 21, no. 3, p. 697, 2021.
- [23] Y. Ohyama, "Engine control using a real-time combustion model," SAE Technical Paper0148-7191, 2001.
- [24] A. B. Alqaity *et al.*, "New insights into methane-oxygen ion chemistry," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 36, no. 1, pp. 1213-1221, 2017.
- [25] A. B. Alqaity *et al.*, "Measurements of positively charged ions in premixed methane-oxygen atmospheric flames," *Combustion science and technology*, vol. 189, no. 4, pp. 575-594, 2017.
- [26] S. Janta-Lipińska, A. Shkarovskiy, and Ł. Chrobak, "Improving the Fuel Combustion Quality Control System in Medium Power Boilers," *Energies*, vol. 17, no. 12, p. 3055, 2024.
- [27] J. M. Beér, M. T. Jacques, and J. D. Teare, "Individual burner air/fuel ratio control optical adaptive feedback control system," MIT Energy Laboratory1982.
- [28] A. V. Prabhu, A. Alagumalai, and A. Jodat, "Artificial neural networks to predict the performance and emission parameters of a compression ignition engine fuelled with diesel and preheated biogas-air mixture: AV Prabhu *et al.*," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 145, no. 4, pp. 1935-1948, 2021.
- [29] W. Yang and W. Blasiak, "Numerical study of fuel temperature influence on single gas jet combustion in highly preheated and oxygen deficient air," *Energy*, vol. 30, no. 2-4, pp. 385-398, 2005.
- [30] H. Guo, F. Liu, G. J. Smallwood, and Ó. L. Gülder, "Numerical study on the influence of hydrogen addition on soot formation in a laminar ethylene-air diffusion flame," *Combustion and Flame*, vol. 145, no. 1-2, pp. 324-338, 2006.
- [31] C. Wang *et al.*, "Co-optimizing NOx emission and power output of a natural gas engine-ORC combined system through neural networks and genetic algorithms," *Energy*, vol. 289, p. 130072, 2024.
- [32] M. Keshavarzadeh *et al.*, "Estimation of NOx pollutants in a spark engine fueled by mixed methane and hydrogen using neural networks and genetic algorithm," *Heliyon*, vol. 9, no. 4, 2023.
- [33] C. Huang *et al.*, "Intelligent Deep Learning Modeling and Multi-Objective Optimization of Boiler Combustion System in Power Plants," *Processes*, vol. 13, no. 8, p. 2340, 2025.
- [34] J. M. Reumschüssel, J. G. von Saldern, B. Ćosić, and C. O. Paschereit, "Data-driven optimization of a gas turbine combustor: A Bayesian approach addressing NOx emissions, lean extinction limits, and thermoacoustic stability," *Data-Centric Engineering*, vol. 5, p. e32, 2024.
- [35] J. Xiao, Q. Liu, S. He, S. Wang, and Z. Zhang, "Prediction and optimization of combustion performance and emissions for lean methane-hydrogen non-premixed flame using RSM-PSO methodology," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 85, pp. 242-251, 2024.
- [36] Y. Lan, Z. Wang, J. Xu, and W. Yi, "The Impact of Hydrogen on Flame Characteristics and Pollutant Emissions in Natural Gas Industrial Combustion Systems," *Energies (19961073)*, vol. 17, no. 19, 2024.
- [37] P. Madejski, T. Janda, N. Modliński, and D. Nabagło, "A combustion process optimization and numerical analysis for the low emission operation of pulverized coal-fired boiler," *Developments in Combustion Technology*, pp. 33-76, 2016.

## English Abstract

# Experimental study of Optimization of the Equivalence Ratio in Gas Burners Using a Genetic Algorithm Approach for Performance Enhancement and Emission Reduction

Amin Jodat<sup>1\*</sup>, Mojtaba Najafian<sup>2</sup>, Saeed Shadmir<sup>3</sup>, Karim Jafarian<sup>4\*\*</sup>

1-Department of Mechanical Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran, a.jodat@ub.ac.ir

2-Research Institute, Applied Science University of North Khorasan, Bojnord, Iran, mn1362@gmail.com

3-Department of Mechanical Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran, eng.shadmir@gmail.com

4-Department of Mechanical Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran, Karim.Jafarian1@gmail.com

\*Corresponding author

(Received: 2025/08/08, Received in revised form: 2025/09/20, Accepted: 2025/10/10)

This study presents an experimental investigation aimed at improving the thermal performance and reducing pollutant emissions of industrial gas burners. Tests were conducted on a steel boiler with a thermal capacity of 100,000 kcal/h, focusing on key parameters such as flame temperature, combustion efficiency, and concentrations of NO<sub>x</sub> and CO across a range of equivalence ratios. Each experiment was repeated and analyzed using the expanded uncertainty method to ensure reliable results. To evaluate multiple performance criteria simultaneously, a genetic algorithm coupled with data normalization techniques was employed. The results showed that increasing the equivalence ratio up to  $\phi = 0.83$  leads to noticeable improvements in both flame temperature and efficiency, after which both begin to decline. The highest NO<sub>x</sub> levels were observed near this ratio but remained within acceptable environmental limits. The lowest CO concentrations occurred in the range  $\phi = 0.80-0.85$ ; however, in some cases, CO exceeded regulatory thresholds and was identified as the limiting factor in determining the optimal equivalence ratio. These findings suggest that fine-tuning the air-to-fuel ratio using intelligent optimization algorithms such as genetic algorithms, can serve as an effective and practical approach to achieve a stable, efficient, and low-emission combustion in industrial gas burners. This method can be readily applied in various sectors including thermal furnaces, power plants, baking processes, and the food industry.

**Keywords:** Gas burners, Genetic algorithm, Equivalence ratio, Emissions, Efficiency, Experimental setup