

مطالعه آزمایشگاهی اثر نسبت‌های مختلف احتراق همزمان گازوئیل-گاز طبیعی بر ویژگی‌های ظاهری و انتقال حرارتی شعله

سید هادی پورحسینی حصاری* استادیار، مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

چکیده

در مشعل‌های گازسوز صنعتی به دلیل وجود دماهای بالا انتقال گرمای تابشی مهم‌ترین مکانیزم انتقال گرما از شعله بوده و سهم قابل توجهی از صدور حرارت باید توسط این روش صورت گیرد. این در حالی است که مشعل‌های گازسوز به رغم استفاده فراوان در صنعت راندمان حرارتی مناسبی نداشته و این امر مشکلات اقتصادی و کیفی متعددی را ایجاد نموده است. در تحقیق حاضر تاثیر احتراق همزمان (هم سوzy) نسبت‌های مختلف گازوئیل-گاز بر خصوصیات ظاهری و انتقال حرارتی شعله گاز طبیعی بررسی شده است. برای تعیین خصوصیات ظاهری شعله از روش تصویربرداری و پردازش تصویر بهره‌گیری شده است. همچنین تابش درخشانی شعله توسط نورسنج خورشیدی و تابش کلی آن توسط یک ترموپیل اندازه‌گیری شده است. با توجه به نقش مهم ذرات دوده در انتقال گرمای تابشی، از تلفیق خاصیت نورتابی شیمیایی زرد و قرمز ذرات دوده با روش تصویربرداری مادون قرمز، امکان تعیین توزیع کیفی ذرات دوده در درون شعله فراهم شده است. همچنین خصوصیات تابش طیفی ذرات دوده توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر BOMEM FTIR تعیین شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که هم سوzy قطرات گازوئیل در شعله گاز طبیعی، ضمن حذف ناحیه تمرکز دما بالای شعله از ابتدای مشعل، باعث ایجاد شعله‌ای حجیم و با توزیع دمای یکنواخت و نیز بهبود انتقال گرمای تابشی شعله و راندمان حرارتی آن خواهد گردید؛ به طوری که با افزایش نسبت هم سوzy از 0 تا 35%، دمای متوسط شعله از 735 K به 1088 K افزایش یافته و انتقال گرمای تابشی و راندمان حرارتی شعله نسبت به حالت بدون تزریق با ضرایب به ترتیب 2.35 و 1.55 افزایش خواهد یافت. این در حالی است که غلظت آلاینده‌های منوکسید کربن و ناکس نیز از حد استاندارد تجاوز نخواهد کرد.

واژه‌های کلیدی: احتراق همزمان گازوئیل-گاز طبیعی، راندمان حرارتی، دوده، تابش.

Experimental Study on the Effect of Different Gasoil-natural Gas Synchronous Combustion Ratio on Flame Structure and Heat Transfer Properties

S. H. Pourhoseini Hesari

Department of Mechanical Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran

Abstract

In industrial natural gas burner, due to high temperature of flame, radiation is the most important mode of heat transfer and a main portion of heat must be transferred via radiation. However, the natural gas burner does not have suitable thermal efficiency, which leads to several commercial and qualitative problem. In the present study, the impact of different synchronous combustion ratio of gasoil-natural gas on flame structure and heat transfer was investigated. The structural and outward flame properties were determined by photography and processing technique. Also, a Solar Power Meter and calibrated thermopile were used to determine the luminous radiation and the total radiation of flame, respectively. Due to the important role of soot particles in flame radiation, the combination of yellow and red chemiluminescence and IR photography of flame were employed to determine the qualitative distribution of soot particles in flame. Also, the spectral radiative characteristics of soot particles were measured by BOMEM FTIR. The result indicated that synchronous combustion of gasoil droplets into natural gas create a volume flame with uniform temperature and enhance the radiation and thermal efficiency of flame. Increase in synchronous combustion from 0 to 35%, rises the average temperature of flame from 735 K to 1088 K and enhance the radiation heat transfer and thermal efficiency 1.55 and 2.35 times greater than pure natural gas, respectively.

Keywords: Gasoil-Natural gas synchronous combustion, Thermal efficiency, Soot, Radiation.

عناصر جاذب و صادر کننده تابش در شعله هستند. صدور تابش از گازها در محدوده مشخصی از طول موج‌ها به نام نوار یا باند نسبت به سایر طول موج‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار است. این در حالی است که ذرات جامد نوعاً دارای ضریب صدور تابش بالاتری در مقایسه با گازها می‌باشند [۴]. بر این اساس نقش ذرات سیاه دوده به عنوان یک جسم خاکستری با ضریب صدور تابش بالا و پیوسته در صدور تابش از شعله بسیار بیشتر از گازهای دی‌اکسیدکربن و بخار آب بوده و تقویت و افزایش غلظت ذرات دوده میانی در شعله می‌تواند عملکرد تابشی آن را بهبود بخشد [۵]. اسنلینگ و همکاران [۶] در تحقیقات خود بر روی تعیین دمای شعله با استفاده از تجزیه و تحلیل امواج تابشی شعله بیان داشتند که تشکیل دوده مستقیماً روی تابش شعله، خصوصیات انتقال حرارتی آن و در نتیجه راندمان احتراق اثر می‌گذارد. بآک و همکاران

۱- مقدمه

احتراق سوخت‌های فسیلی مهم‌ترین منبع تولید انرژی در جهان امروز است. رشد بی‌رویه مصرف انرژی، محدود بودن و کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و اثرات مخرب زیست محیطی حاصل از احتراق این سوخت‌ها توجه بسیاری از محققین را به مطالعه آزمایشگاهی و مدل‌سازی فرآیند و پارامترهای احتراق سوخت‌های فسیلی به منظور افزایش راندمان حرارتی و کاهش انتشار آلاینده‌ها معطوف نموده است. به دلیل وجود دماهای بالا در شعله، انتقال گرمای تابشی یکی از مدهای اصلی انتقال گرما بوده و نقش مهمی بر بهبود راندمان حرارتی شعله دارد [۱]. این در حالی است که بهبود انتقال گرمای تابشی می‌تواند با تخلیه انرژی حرارتی شعله تاثیر بسزایی بر کاهش تولید و انتشار آلاینده ناکس نیز داشته باشد [۲-۳]. دی‌اکسیدکربن، بخار آب و ذرات دوده مهم‌ترین

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hadipoorhoseini@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۹/۲۶

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۱/۰۶

[۷] در تحقیقی اثر تزریق ذرات جامد اکسید آلومینیوم و زغال سنگ را بر دما و انتقال گرمای تابشی شعله هیدروژن-هوا مورد بررسی قرار داده و دریافتند که تزریق ذرات غیر واکنش دهنده اکسید آلومینیوم به شعله باعث کاهش شار گرمایی کل و شار انتقال گرمای تابشی بر روی دیواره کوره می‌شود. این در حالی است که تزریق ذرات زغال سنگ و واکنش این ذرات در شعله باعث بهبود انتقال گرمای تابشی شعله گردید. در پژوهشی دیگر هانتی و لی [۸] تاثیر تزریق ذرات پودر زغال سنگ را بر انتقال گرمای تابشی شعله هیدروژن-هوا مورد بررسی قرار دادند. این محققین با بررسی فرآیند تشکیل دوده توسط زغال سنگ و سهم و تاثیر آن بر انتقال گرمای تابشی از شعله، اضافه کردن پودر زغال سنگ به شعله غیردرخشان هیدروژن را برای تولید دوده و بهبود تابش و راندمان حرارتی آن پیشنهاد کردند. ساجی و همکاران [۹] اثر تولید و اکسیداسیون دوده بر انتقال گرمای تابشی شعله غیر پیش آمیخته اتیلن-هوا را مورد مطالعه قرار دادند. این پژوهشگران علت انتخاب اتیلن را غیر اشباع بودن این سوخت هیدروکربنی و نقش مهم هیدروکربن‌های غیر اشباع نظیر اتیلن، استیلن و بنزن در تولید دوده اعلام کردند. آنها دریافتند که با در نظر گرفتن تابش دوده دمای حداکثر شعله 150°C کاهش می‌یابد. همچنین مکان حداکثر دوده در شعله و مکان حداکثر انحراف در نمودار توزیع دما در حالت با تابش و بدون در نظر گرفتن تابش دوده بر هم منطبق است که نشان دهنده نقش مهم ذرات دوده در توزیع و پخش حرارت از طریق تابش است. اس سی پائول و ام سی پائول [۱۰] در پژوهشی مشابه انتقال گرمای تابشی از شعله درهم و غیر پیش آمیخته پروپان-هوا را در یک محفظه احتراق سه بعدی مورد بررسی قرار دادند. مطالعات این محققین نشان می‌دهد که دوده مهمترین گونه در ضریب جذب و صدور تابش شعله‌های درخشان و زرد رنگ است. آنها همچنین دریافتند در مناطقی از شعله که غلظت ذرات دوده در آنجا بیشتر است، آهنگ انتقال گرمای تابشی شعله نیز بیشتر می‌باشد که این امر نیز بر نقش مهم ذرات سیاه دوده در انتقال گرمای تابشی شعله دلالت دارد.

گاز طبیعی سبک‌ترین و پاک‌ترین سوخت هیدروکربنی است که استفاده از آن در غالب مشعل‌های گازسوز رو به گسترش است [۱۱]. این در حالی است که جایگزینی مشعل‌های گازوئیل‌سوز با نوع گاز طبیعی سوز آن در صنایع مختلف باعث کاهش راندمان حرارتی شده و مشکلات فنی و اقتصادی متعددی را ایجاد نموده است [۱۲]. تحقیقات مختلف نشان دهنده تاثیر مثبت افزایش غلظت ذرات دوده میانی در درون شعله بر بهبود خصوصیات انتقال گرمای تابشی و راندمان حرارتی آن است. بنابراین افزایش غلظت ذرات دوده میانی در شعله گاز طبیعی می‌تواند راهکاری برای بهبود انتقال گرمای تابشی و راندمان حرارتی آن باشد. از سوی دیگر از دیدگاه کاربردی تولید ذرات دوده در درون شعله باید با یک روش ساده، عملی و قابل کنترل صورت گیرد. در تحقیق حاضر از تکنیک استفاده همزمان از دو سوخت گاز و گازوئیل با استفاده از تزریق قطرات گازوئیل به درون شعله گاز طبیعی در مشعل‌های دوگانه سوز برای تولید ذرات دوده میانی در درون شعله گاز طبیعی استفاده شده و تاثیر هم سوزی مقادیر مختلف گازوئیل-گاز بر شکل ظاهری شعله، دما، انتقال گرمای تابشی و راندمان حرارتی آن مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به وجود منابع این دو سوخت در کشور و امکان پیاده‌سازی این روش بر روی مشعل‌های موجود و تبدیل آنها از حالت دوگانه سوز به

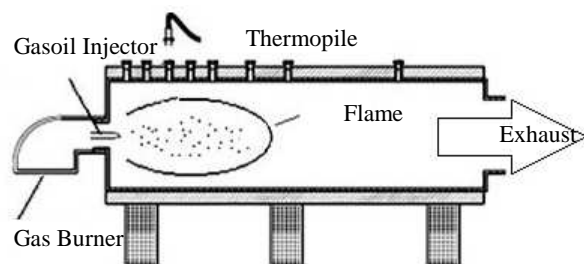
همزمان سوز، این روش راهکاری اقتصادی مناسب و قابل اجرا برای تولید ذرات دوده در درون شعله و بهینه سازی انتقال گرمای تابشی و راندمان حرارتی مشعل‌های با سوخت اصلی گاز طبیعی بوده و با تغییر نسبت هم سوزی این دو سوخت می‌توان شعله ای با حجم، توزیع دما و شار انتقال گرمای تابشی مورد نیاز را ایجاد نمود.

۲- بستر و تجهیزات آزمایش

بستر آزمایش متشکل از یک مشعل گازسوز با ظرفیت گرمایی حداکثر صد هزار کیلو کالری بر ساعت است که بر روی یک محفظه احتراق آزمایشگاهی به طول ۱۰۰۰ میلی‌متر و قطر ۴۵۰ میلی‌متر نصب شده است (شکل ۱). دبی جریان گاز ورودی به مشعل ۳.۸۰۴ متر مکعب در ساعت می‌باشد. برای تزریق قطرات گازوئیل به درون شعله از یک نازل با قطر ۱۰۰ میکرومتر استفاده شده است. این نازل در امتداد محور مرکزی مشعل نصب گردیده و جریان گازوئیل را به صورت اسپری به درون شعله گاز طبیعی پرتاب می‌کند. همچنین یک پمپ دنده‌ای با قابلیت تنظیم دبی، جریان گازوئیل را در پشت نازل را برقرار می‌کند. به منظور اندازه‌گیری پارامترهای احتراقی دما و شار انتقال گرمای تابشی، سوراخ‌هایی با فواصل ۶، ۱۸، ۳۰ و ۴۲ سانتی‌متر بر روی دیواره کوره تعبیه شده است. علاوه بر این برای اندازه‌گیری راندمان حرارتی شعله از یک مبادله‌کن گرما استفاده شده است. این مبادله‌کن از جنس لوله مانسمان بدون درز و مقاوم در برابر حرارت ساخته شده و به صورت کوئل مارپیچ فنری در مجاورت دیواره داخلی کوره قرار گرفته است [۱۳]. سیال عامل در مبادله‌کن گرما آب است که با دمای اولیه 21°C وارد مبادله‌کن شده و بعد از جذب حرارت از شعله در دمایی بالاتر از آن خارج می‌شود. بنابراین بر مبنای قانون اول ترمودینامیک راندمان حرارتی را می‌توان به صورت زیر فرمول بندی کرد:

$$\eta_{th} = \frac{Q_{absorb}}{Q_{in}} \quad (1)$$

در رابطه (۱) Q_{absorb} گرمای جذب شده توسط جریان آب عبوری از مبادله‌کن بوده و Q_{in} مجموع انرژی ورودی حاصل از دو سوخت گاز و گازوئیل می‌باشد؛ که از ضرب ارزش حرارتی این دو سوخت در دبی حجمی آنها محاسبه می‌شود.



شکل ۱- بستر انجام آزمایش

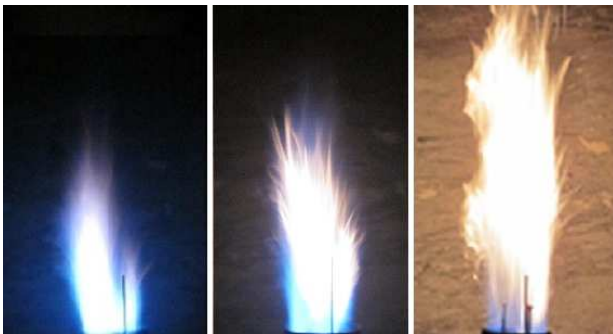
ارزش حرارتی گاز طبیعی ۸۱۱۷ کیلوکالری بر متر مکعب و ارزش حرارتی گازوئیل ۸۳۵۰ کیلوکالری بر لیتر است [۱۳]. همچنین بر اساس اختلاف دمای ایجاد شده بین جریان آب ورودی و خروجی از مبادله‌کن گرما، Q_{absorb} از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$Q_{absorb} = \dot{m}c\Delta T \quad (2)$$

برای انجام آزمایش ابتدا در حالت بدون تزریق مشعل گاز سوز بر روی کوره نصب گردیده و بعد از رسیدن کوره به شرایط پایدار، اندازه-گیری و ثبت اطلاعات آزمایش انجام گرفته است. سپس مشعل خاموش و بعد از رسیدن سیستم به حالت اولیه، مراحل فوق برای مقادیر مختلف تزریق قطرات گازوئیل تکرار گردید. همچنین برای اطمینان از صحیح بودن نتایج به دست آمده، آزمایش‌ها در دو نوبت تکرار و عدم قطعیت توسعه یافته اندازه‌گیری هر پارامتر که از ترکیب دقت تجهیزات اندازه-گیری و تکرار آزمایش حاصل می‌شود با سطح اطمینان 95٪ محاسبه و در نمودارهای مربوطه درج شده است.

۳- ارائه و بررسی نتایج

شکل ۲ تصویر شعله را در نسبت‌های مختلف هم سوزی گازوئیل-گاز طبیعی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت هم سوزی گازوئیل در گاز طبیعی میزان درخشندگی و زردسوزی شعله افزایش می‌یابد. درخشندگی شعله وابسته به مقدار ذرات جامد واکنش دهنده‌ای است که در شعله وجود دارند. در شعله سوخت‌های هیدروکربنی ذره جامدی که در شعله وجود دارد دوده است، که وقتی حرارت می‌بیند از خود روشنایی زرد رنگی را متصاعد می‌کند. این پدیده نورتابی شیمیایی نام دارد [۱۹]. میزان تشکیل دوده در داخل شعله با عدد کربن زنجیره سوخت (نسبت تعداد اتم‌های کربن به هیدروژن) متناسب بوده و با افزایش تعداد اتم‌های کربن سوخت افزایش می‌یابد [۲۰]. این نسبت در شعله گاز طبیعی 0.25 است؛ در حالیکه برای گازوئیل این عدد برابر 0.55 می‌باشد. بنابراین با افزایش نسبت هم سوزی گازوئیل در گاز طبیعی آهنگ تشکیل دوده در درون شعله افزایش یافته و رنگ شعله درخشان و زردتر خواهد شد.



شکل ۲- تصویر شعله در نسبت هم سوزی گازوئیل-گاز=0 (تصویر چپ)، 10% (تصویر وسط) و 35% (تصویر راست)

سوخت‌های هیدروکربنی نظیر گازوئیل در اثر قرار گرفتن در محیط داغ و کم اکسیژن عمدتاً به ذرات دوده تجزیه حرارتی می‌شوند. بنابراین با تزریق قطرات گازوئیل به درون شعله گاز طبیعی غلظت سایر گونه‌های موجود در شعله تغییر چندانی نیافته و نورتابی شیمیایی آنها که در محدوده طیف مرئی است، بدون تغییر خواهد بود. این بدین معنی است که تغییر شدت طیف مرئی گسیل شده از شعله صرفاً متناسب با تغییر غلظت ذرات دوده درون شعله است و در نتیجه اندازه‌گیری کمی این طیف مرئی و مقایسه آن در حالت‌های مختلف معیاری از آهنگ تشکیل دوده خواهد بود. در شکل ۳ شدت طیف مرئی شعله در نسبت‌های

در رابطه (۲)، $\dot{m} = 0.143 \text{ kgs}^{-1}$ دبی جرمی جریان آب عبوری از مبادله‌کن گرم، $C = 4.184 \text{ Jg}^{-1}\text{C}^{-1}$ ظرفیت گرمایی ویژه آب و ΔT اختلاف دمای بین جریان آب ورودی به مبادله‌کن گرم و جریان آب خروجی از آن در حالت پایدار است [۱۴].

دما مهم‌ترین پارامتر در آنالیز احتراقی شعله است که بر روی دیگر پارامترها و از جمله تشکیل آلاینده‌ها موثر است. بنابراین اندازه‌گیری صحیح دمای شعله از اهمیت بالایی برخوردار است. در تحقیق حاضر برای اندازه‌گیری دمای شعله از یک ترموکوپل نوع S با بیشینه دمای کارکرد 1800 K و دقت $\pm 2.5^\circ\text{C}$ استفاده شده است. این ترموکوپل برای جلوگیری از تاثیر تابش دیواره کوره بر روی آن و بروز خطا در اندازه‌گیری دما در درون یک غلاف که به عنوان سپر تابشی عمل می‌کند قرار گرفته است. دقت بالا، قابلیت تحمل دمای بالا و عدم واکنش شیمیایی با گونه‌های موجود در شعله باعث شده تا این ترموکوپل، در اندازه‌گیری دما در فرآیندهای احتراقی کاربرد فراوانی داشته باشد. [۱۵-۱۶].

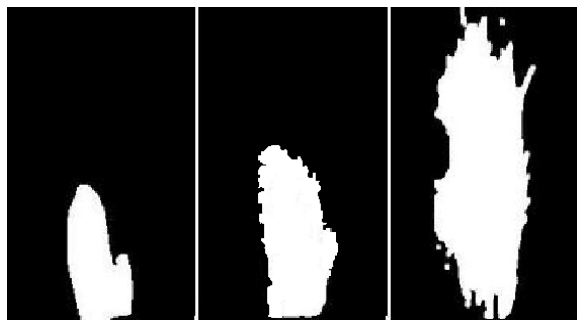
با توجه به اهمیت و نقش انتقال گرمای تابشی در صدور حرارت از شعله، اندازه‌گیری دقیق شار تابشی شعله بسیار حائز اهمیت است. برای اندازه‌گیری میزان تابش در ناحیه فرورسرخ و مرئی از آشکارسازهای حرارتی و فوتونی استفاده می‌شود. آشکارسازهای حرارتی بر پایه گرم کردن یک عضو به وسیله شار تابشی فرودی بر آن استوار است. این آشکارسازها معمولاً از ترموکوپل‌هایی ساخته شده که برای افزایش دقت به طور سری به هم متصل شده اند و به آنها ترموپیل می‌گویند. در تحقیق حاضر برای اندازه‌گیری شار انتقال گرمای تابشی شعله از آشکار ساز حرارتی ترموپیل استفاده شده است. ترموپیل مورد استفاده از نوع کیپ زون^۱ است و از سری کردن 16 ترموکوپل آلیاژی کنستانتن-منگنین ساخته شده است. این ترموپیل دارای دقتی برابر 0.02 شار تابشی فرودی بر روی آن بوده و قابلیت کارکرد در محدوده دمایی $200-1500^\circ\text{C}$ و طول موج‌های 0.2 تا 50 میکرومتر را داراست [۱۶].

به منظور بررسی اثر هم سوزی مقادیر مختلف گازوئیل-گاز طبیعی بر خصوصیات ظاهری شعله از تکنیک تصویربرداری از شعله و پردازش تصویر حاصل با نرم افزار matlab استفاده شده است. این در حالی است که برای حذف نورهای مزاحم تصویربرداری در محیط تاریک انجام گرفته است. همچنین از روش غیر تماسی تصویربرداری مادون قرمز برای تعیین توزیع کیفی ذرات دوده در شعله بهره‌گیری شده است. این روش مبتنی بر خاصیت نورتابی شیمیایی ذرات دوده در محدوده مادون قرمز نزدیک بوده و توسط فیلتر مادون قرمز انجام می‌گیرد.

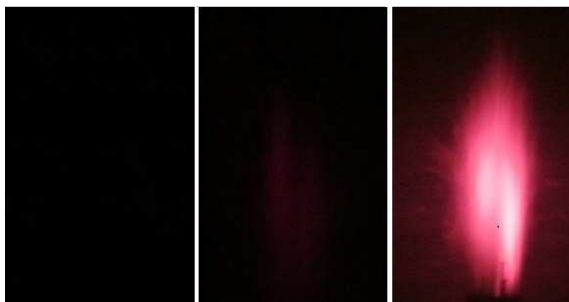
برای اندازه‌گیری تابش درخشانی شعله که در محدوده طول موج-های مرئی صورت می‌گیرد از نورسنج خورشیدی مدل TES-1333 Solar Power Meter استفاده شده است. این وسیله قادر به اندازه‌گیری تابش‌های طیف مرئی امواج الکترومغناطیسی تا مقدار حداکثر 2000 W.m^{-2} با دقتی برابر $10 \text{ W.m}^{-2} \pm$ می‌باشد [۱۷-۱۸]. همچنین با توجه به نقش مهم ذرات دوده در ضریب صدور تابش کلی شعله از دستگاه اسپکتروفوتومتر BOMEM FTIR Spectrophotometer برای تعیین خصوصیات تابشی طیفی ذرات دوده بهره‌گیری شده است.

^۱ KIPP&ZONEN, CA-2

مادون قرمز شعله در نسبت‌های مختلف هم سوزی نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش نسبت هم سوزی گازوئیل-گاز، سطح و شدت رنگ زرد و قرمز افزایش می‌یابد که نشان دهنده افزایش غلظت ذرات دوده در درون شعله به دلیل تجزیه حرارتی قطرات گازوئیل است. آهنگ تجزیه حرارتی متناسب با دماست و چون در قسمت هسته مرکزی شعله دمای شعله بیشترین مقدار را داراست، بنابراین شدت رنگ زرد و غلظت ذرات دوده در این ناحیه بیشتر از سایر قسمت‌های شعله است. بر اساس قانون پلانک برای تابش جسم سیاه، با افزایش دمای جسم سیاه شدت طول موج‌های مرئی گسیل شده از آن از قرمز دور و به رنگ زرد نزدیک می‌شود. این الگو با رفتار تابشی ذرات دوده که در شکل ۵ به تصویر کشیده شده مطابقت کامل دارد به طوری که تابش مرئی ذرات دوده‌ای که در هسته مرکزی و دما بالای شعله هستند به صورت رنگ زرد نمایان شده و با حرکت به خارج شعله و کاهش دما این رنگ به قرمز متمایل می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که ذرات دوده در درون شعله از لحاظ تابشی عملکردی نزدیک به جسم سیاه به عنوان جسم ایده‌آل صادر کننده تابش بازی می‌کنند و در نتیجه افزایش غلظت آنها در درون شعله بهبود آهنگ انتقال گرمای تابشی شعله را به دنبال دارد.



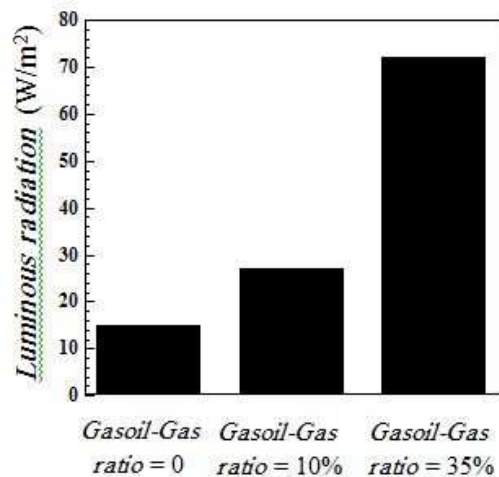
شکل ۴- سطح واکنشی شعله در نسبت هم سوزی گازوئیل-گاز=0 (تصویر چپ)، 10% (تصویر وسط) و 35% (تصویر راست)



شکل ۵- تصویر مادون قرمز شعله در نسبت هم سوزی گازوئیل-گاز=0 (تصویر چپ)، 10% (تصویر وسط) و 35% (تصویر راست)

در شکل ۶ نمودار جذبندگی طیفی ذرات دوده در طول موج‌های مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که ذرات دوده بیش از 97% تابش را در طول موج‌های مادون قرمز نزدیک و مرئی جذب می‌کنند. بر اساس نتایج شکل ۵، ذرات دوده رفتاری نزدیک به جسم سیاه دارند و چون برای جسم سیاه ضریب جذب و صدور تابش با هم برابر است بنابراین در مورد ذرات دوده نیز ضریب صدور تابش در محدوده مادون قرمز نزدیک و مرئی بسیار بالا و نزدیک به 1 است و این امر بهبود انتقال گرمای تابشی شعله را به دنبال دارد.

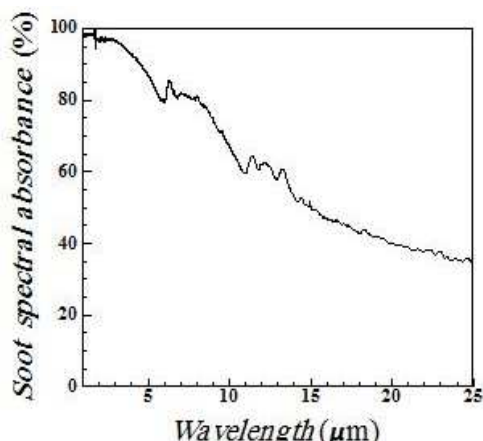
مختلف هم سوزی گازوئیل-گاز به تصویر کشیده شده است. مطابق شکل با افزایش نسبت هم سوزی، به دلیل افزایش طیف مرئی زرد رنگ ناشی از تشکیل ذرات دوده در درون شعله، شدت کلی طیف مرئی گسیل شده از شعله مرتباً افزایش می‌یابد به طوری که با توجه به ارتباط مستقیم این طیف با آهنگ تشکیل ذرات دوده می‌توان گفت که با افزایش نسبت هم سوزی از 0 تا 35%، غلظت نسبی ذرات دوده در درون شعله از 0 تا 380% درصد تغییر خواهد کرد. به عبارت دیگر 35% هم سوزی باعث افزایش 3.8 برابری غلظت دوده درون شعله گاز طبیعی خواهد شد.



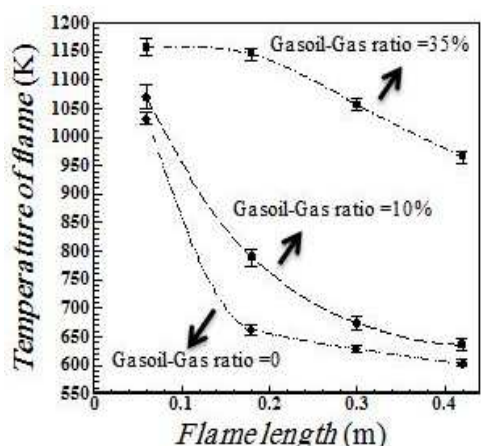
شکل ۳- شدت تابش مرئی شعله در نسبت‌های مختلف هم سوزی گازوئیل-گاز

یکی از ویژگی‌های مهم شعله سوخت‌های مایع و جامد در مقایسه با شعله گاز طبیعی داشتن شعله‌ای حجیم است. این در حالی است که شعله‌های حجیم و با طول زیاد نسبت به شعله‌های کوتاه و متمرکز از عملکرد انتقال گرمای مناسبتری نیز برخوردار می‌باشند. برای بررسی تاثیر هم سوزی سوخت مایع گازوئیل در سوخت گاز طبیعی بر هندسه شعله، در شکل ۴ با استفاده از روش پردازش تصویر شعله، سطح ناحیه واکنشی شعله برای مقادیر مختلف هم سوزی مقایسه شده است. مطابق این تصویر، با افزایش نسبت هم سوزی گازوئیل-گاز طبیعی، حجم (سطح) شعله افزایش می‌یابد. سطح واکنشی شعله تابع مستقیمی از آهنگ اختلاط سوخت و هواست. از سوی دیگر آهنگ اختلاط مواد هم فاز نسبت به مواد غیر هم فاز بیشتر بوده و مواد هم فاز اختلاط سریعتر و کاملتری در مقایسه با مواد غیر هم فاز دارند. بر این اساس شعله سوخت‌های گازی نظیر گاز طبیعی-هوا نسبت به شعله سوخت‌های جامد-هوا و سوخت‌های مایع-هوا دارای ناحیه واکنشی بسیار کوچکتری بوده و بسیار کم حجم و کوتاه است و هم سوزی قطرات سوخت مایع گازوئیل در درون شعله گاز طبیعی باعث افزایش ناحیه واکنشی و حجم شعله در مقایسه با شعله گاز طبیعی شده و سبب بهبود انتقال گرما از شعله خواهد گردید.

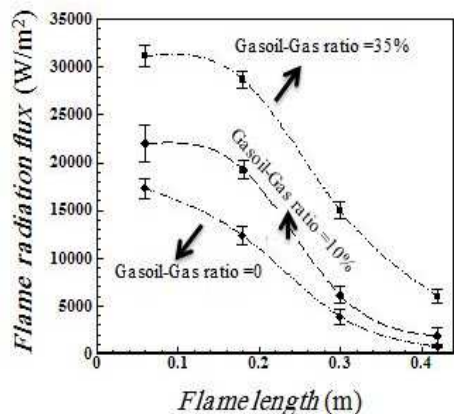
ذرات دوده در محدوده مادون قرمز نزدیک به مرئی تابش می‌کنند. این محدوده شامل طول موج‌های رنگ زرد و قرمز در ناحیه طیف مرئی و طول موج‌های ابتدایی ناحیه مادون قرمز می‌باشد. بنابراین با استفاده از تکنیک تصویربرداری مادون قرمز و حذف دیگر طیف‌ها، می‌توان چگونگی توزیع ذرات دوده در درون شعله را بررسی کرد. شکل ۵ تصویر



شکل ۶- نمودار جذبمندی طیفی ذرات دوده درون شعله



شکل ۷- دمای محوری شعله در نسبت‌های مختلف هم سوژی گازوئیل-گاز



شکل ۸- شار انتقال گرمای تابشی کلی شعله در نسبت‌های مختلف هم سوژی گازوئیل-گاز

از دیدگاه عملی راندمان حرارتی پارامتری است که از آن برای بررسی عملکرد مناسب مشعل استفاده می‌شود. در شکل ۹ راندمان حرارتی شعله در نسبت‌های مختلف هم سوژی به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود با افزایش نسبت هم سوژی راندمان حرارتی شعله نیز افزایش می‌یابد. به طوری که ۳۵٪ هم سوژی قطرات گازوئیل در درون شعله گاز طبیعی افزایش ۱.۵۵ راندمان حرارتی شعله را نسبت به حالت بدون تزریق به دنبال دارد. این امر نشان

در شکل ۷ توزیع دمای محوری شعله برای نسبت‌های مختلف هم سوژی نشان داده شده است. مطابق شکل با افزایش نسبت هم سوژی گازوئیل-گاز طبیعی از ۰ تا ۳۵٪ دمای متوسط شعله از ۷۳۵ K به ۱۰۸۸ K افزایش یافته و توزیع دمای شعله نیز یکنواخت‌تر می‌شود. در شعله گاز طبیعی به دلیل اختلاط سریع گاز طبیعی و هوا، دمای حداکثر شعله به ورودی مشعل نزدیک است. این در حالی است که سوخت‌های جامد و مایع دارای زمان واکنش احتراق طولانی‌تری هستند و دمای حداکثر آنها نسبت به شعله گاز طبیعی در فاصله دورتری از ابتدای کوره اتفاق می‌افتد. بنابراین با هم سوژی گازوئیل-گاز طبیعی، این دو توزیع دما با هم ترکیب شده و شعله‌ای با توزیع دمای یکنواخت ایجاد می‌شود؛ به طوری که قطرات گازوئیل در قسمت ابتدایی شعله گاز طبیعی گرما را از شعله جذب کرده و تبخیر و تجزیه حرارتی می‌شوند و کاهش دما در ابتدای شعله گاز طبیعی را ایجاد می‌نمایند. اما این ذرات در پایین دست شعله محترق شده و سبب افزایش دما در این ناحیه می‌شوند که تلفیق این دو ناحیه سبب ایجاد شعله‌ای با توزیع دمای یکنواخت و بهبود عملکرد انتقال گرمایی شعله خواهد شد.

در شکل ۸ شار انتقال گرمای تابشی کل (مرئی و مادون قرمز) بر روی دیواره کوره در نسبت‌های مختلف هم سوژی گازوئیل-گاز طبیعی نشان داده شده است. مطابق شکل ۸ هم سوژی گازوئیل-گاز طبیعی شار انتقال گرمای تابشی شعله را به میزان قابل توجهی افزایش داده و با بالا رفتن نسبت هم سوژی این افزایش در شار انتقال گرمای تابشی نیز بیشتر می‌شود به طوری که با افزایش نسبت هم سوژی از ۰ تا ۳۵٪، متوسط شار انتقال گرمای تابشی شعله از 8576 W.m^{-2} به 20225 W.m^{-2} افزایش می‌یابد. بر اساس قانون استفان بولتزمن، شار انتقال گرمای تابشی با دما و ضریب صدور تابش ارتباط مستقیم دارد. بر اساس نتایج حاصله از شکل‌های ۲ تا ۷ هم سوژی گازوئیل در گاز طبیعی هم باعث افزایش ضریب صدور تابش شعله به دلیل تولید ذرات سیاه دوده فعال در درون شعله می‌شود و هم متوسط دمای شعله را افزایش می‌دهد. بنابراین هر دو عامل سبب بهبود آهنگ انتقال گرمای تابشی شعله خواهد گردید. نکته قابل توجه اینست که در نسبت‌های هم سوژی کوچک، تاثیر بهبود ضریب صدور تابش شعله در افزایش شار انتقال گرمای تابشی بیشتر از افزایش دماست، در حالیکه با افزایش نسبت هم سوژی تاثیر افزایش دما بیشتر از ضریب صدور تابش خواهد بود. بر این اساس در نسبت هم سوژی گازوئیل-گاز ۱۰٪، به دلیل پایین بودن دبی سوخت، تغییرات دمایی در مقایسه با نسبت هم سوژی ۰٪ (شعله گاز طبیعی بدون تزریق گازوئیل)، جزئی است و در نتیجه در این حالت بهبود ضریب صدور تابش شعله عامل اصلی افزایش شار انتقال گرمای تابشی است، در حالیکه در نسبت هم سوژی ۳۵٪، به دلیل آزاد شدن انرژی حرارتی قابل توجه از احتراق قطرات گازوئیل، سهم افزایش دما نیز در بهبود شار انتقال گرمای تابشی شعله حائز اهمیت خواهد بود. همچنین از مقایسه شار انتقال گرمای تابشی کل با شار انتقال گرمای تابشی در محدوده طیف مرئی (تابش درخشانی) که در شکل ۳ نشان داده شد می‌توان دریافت که سهم تابش درخشانی از انتقال گرمای تابشی کل در مقایسه با تابش در محدوده مادون قرمز ناچیز بوده و در نتیجه گسیل تابش حرارتی توسط امواج فرسرخ مکانیزم اصلی انتقال گرمای تابشی است.

- با افزایش نسبت هم سوzy گازوئیل-گاز طبیعی، غلظت ذرات دوده در درون شعله نیز افزایش یافته و طول موج‌های مادون قرمز گسیل شده از شعله افزایش می‌یابد.

یافته‌های پژوهش حاضر می‌تواند راهکاری علمی-عملی برای بهبود راندمان حرارتی پایین مشعل‌های گازی و ایجاد توزیع دمایی یکنواخت در کوره‌های با مشعل گازسوز باشد.

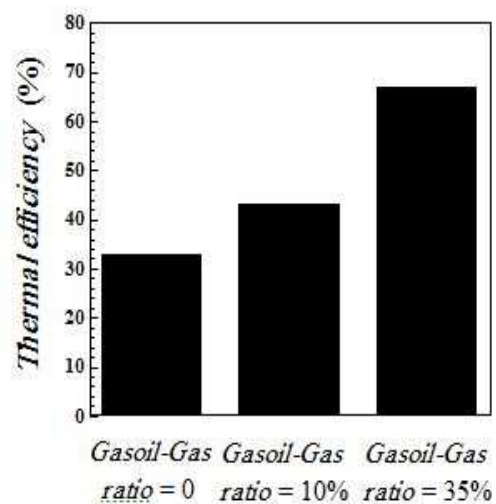
۵- تقدیر و تشکر

نویسنده کمال تشکر و قدردانی خود را از معاونت پژوهشی مجتمع آموزش عالی گناباد به جهت حمایت طرح اعلام می‌دارد.

۶- مراجع

- [1] Bulter B. W., Denison M. K., Webb B. W., Radiation heat transfer in a laboratory scale pulverized coal fired reactor, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 9, pp. 69-79, 1994.
- [2] Frank J. H., Barlow R. S., Lundquist C., Radiation and nitric oxide formation in turbulent non-premixed jet flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, pp. 447-454, 2000.
- [3] Watanabe H., Suwa Y., Matsushita Y., Morozumi Y., Aoki H., Tanno S., Miura T., Spray combustion simulation including soot and NO formation, *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, pp. 2077-2089, 2007.
- [4] Incropera F. P., Dewitt D. P., Bergman T. L., Lavine A. S., *Introduction to Heat Transfer*, Fifth Edition, pp. 400-496, New York: Wiley, 2006.
- [5] Khatami R., Levendis Y. A., On the deduction of single coal Particle combustion temperature from three color optical pyrometry, *Combustion and Flame*, Vol. 158, pp. 1822-1836, 2011.
- [6] Snelling D. R., Thomson K. A., Smallwood G. J., Gulder O. L., Weckman E. J., Fraser R. A., Spectrally resolved measurement of flame radiation to determine soot temperature and concentration, *AIAA Journal*, Vol. 40, pp. 1789-1795, 2002.
- [7] Baek S. W., Kim J. J., Kim H. S., Kang S. H., Effects of addition of solid particles on thermal characteristics in hydrogen-air flame, *Combustion Science and Technology*, Vol. 174, No. 8, pp. 99-116, 2002.
- [8] Huntly W. P., Lee G. K., Improved radiative heat transfer from hydrogen flames, *J. Hydrogen Energy*, Vol. 16, No. 1, pp. 47-53, 1991.
- [9] Saji C. B., Balaji C., Sundararajan T., Investigation of soot transport and radiative heat transfer in an ethylene jet diffusion flame, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 4287-4299, 2008.
- [10] Paul S. C., Paul M. C., Radiative heat transfer during turbulent combustion process, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1-6, 2010.
- [11] Kakaee A. H., Rahnama P., Paykani A., Influence of fuel composition on combustion and emissions characteristics of natural gas/diesel RCCI engine, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 25, pp. 58-65, 2015.
- [12] Javadi S. M., Moghiman M., Experimental study of natural gas temperature effects on the flame luminosity and NO emission in a 120 kW boiler, *Fuel and Combustion Journal*, Vol. 4, pp. 87-95, 2011.
- [13] Pourhoseini S. H., Moghiman M., Effect of pulverized anthracite coal particles injection on thermal and radiative characteristics of natural gas flame: an experimental study, *Fuel*, vol. 140, pp. 44-49, 2015.
- [14] Heat capacity of liquid water from 0 to 100 C. www.vaxasoftware.com, 2016.
- [15] Pourhoseini S. H., Saeedi A., Moghiman M., Experimental and numerical study on the effect of soot injection on Nox reduction and radiation enhancement in a natural gas turbulent

دهنده بهبود صدور انرژی حرارتی تولید شده در درون شعله در اثر بهبود انتقال گرمای تابشی است و در نتیجه بهره‌گیری از تکنیک هم سوzy راهکاری عملی برای بهبود راندمان حرارتی پایین مشعل‌های گاز طبیعی خواهد بود. باید توجه داشت که از دیدگاه زیست محیطی بهبود عملکرد و راندمان حرارتی سیستم‌های احتراقی باید به گونه‌ای باشد که غلظت آلاینده‌های حاصل از احتراق از حد مجاز و استاندارد تجاوز نکند. بنابراین از آنجا که احتراق ناقص ذرات دوده می‌تواند باعث افزایش غلظت آلاینده منوکسیدکربن گردد، در نتیجه دی‌های تزریق گازوئیل برای هم سوzy در شعله گاز طبیعی به گونه‌ای انتخاب گردید که غلظت آلاینده منوکسیدکربن در خروجی محفظه احتراق کمتر از حد استاندارد ۱۵۰ پی پی ام باشد. این موضوع از طریق قرار دادن دستگاه آنالیز گاز Testo 350 در خروجی کوره و اندازه‌گیری غلظت منوکسیدکربن صورت گرفته است. به طوری که در نسبت هم سوzy 35% غلظت آلاینده منوکسیدکربن از ۱۴۰ PPM تجاوز نکرد. همچنین به دلیل پایین تر بودن دمای شعله از مقدار ۱۸۰۰ K، آهنگ تشکیل آلاینده NOX حرارتی نیز بسیار ناچیز بوده و بسیار کمتر از حد استاندارد ۳۰۰ PPM می‌باشد.



شکل ۹ راندمان حرارتی شعله در نسبت‌های مختلف هم سوzy گازوئیل-گاز

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر اثر نسبت‌های مختلف هم سوzy گازوئیل-گاز طبیعی بر خصوصیات ظاهری و انتقال بی‌گرما، شعله گاز طبیعی مورد مطالعه قرار گرفته است. یافته‌های اصلی این پژوهش عبارتند از:

- افزایش نسبت هم سوzy گازوئیل-گاز طبیعی باعث حذف تمرکز دمایی شعله گاز طبیعی در ابتدای مشعل و ایجاد شعله‌ای حجیم و با توزیع دمایی یکنواخت می‌شود.
- با افزایش نسبت هم سوzy گازوئیل-گاز، دمای متوسط شعله و شار انتقال گرمای تابشی آن افزایش می‌یابد.
- در نسبت‌های هم سوzy کوچک، بهبود ضریب صدور تابش شعله عامل افزایش شار انتقال گرمای تابشی است در حالی که با افزایش نسبت هم سوzy، اثر افزایش دمای متوسط شعله غالب می‌گردد.

- flame, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 38, pp. 69-75, 2013.
- [16] Augustine C., Tester J. W., Hydrothermal flames: from phenomenological experimental demonstrations to quantitative understanding, *The Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 47, pp. 415-430, 2009.
- [17] Madadi V., Tavakoli T., Rahimi A., First and second thermodynamic law analyses applied to a solar dish collector, *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, Vol. 39, pp. 183-197, 2014.
- [18] Murali G., Mayilsamy K., Arjunan T. V., An experimental study of PCM-incorporated thermosyphon solar water heating system, *International Journal of Green Energy*, Vol. 12, pp. 978-986, 2015.
- [19] Augustine C., Tester J. W., Hydrothermal flames: from phenomenological experimental demonstrations to quantitative understanding, *The Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 47, pp. 415-430, 2009.
- [20] Gruenberger T. M., Moghiman M., Bowen P. J., Syred N., Dynamic of soot formation by turbulent combustion and thermal decomposition of natural gas, *Journal of Combustion Science and Technology*, Vol. 174, pp. 67-86, 2002.