



## مطالعه آزمایشگاهی اثر هم‌سوزی گاز-گازوئیل بر درخشندگی و انتقال حرارت تابشی شعله گاز طبیعی

سید هادی پورحسینی<sup>1</sup>، محمد مقیمان<sup>2\*</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی گناباد، مشهد

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

\* مشهد، صندوق پستی 9193735961، moghiman@um.ac.ir

### اطلاعات مقاله

### چکیده

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 22 تیر 1393  
پذیرش: 23 شهریور 1393  
ارائه در سایت: 26 مهر 1393  
کلید واژگان:  
گاز طبیعی  
هم‌سوزی  
اسپری گازوئیل  
انتقال حرارت تابشی

در تحقیق حاضر اثر هم‌سوزی گاز-گازوئیل از طریق تزریق قطرات گازوئیل به درون شعله گاز طبیعی بر درخشندگی و انتقال حرارت تابشی مورد مطالعه قرار گرفته است. تزریق قطرات با استفاده از یک نازل میکرونی تک پاشش با قطر 100 میکرومتر و فشار پاشش 9 بار انجام شده است. برای اندازه‌گیری تابش درخشانی از یک آشکارساز فوتوولتائیک و برای اندازه‌گیری تابش کل شعله (ترکیب تابش‌های حرارتی و درخشانی) از یک ترموپیل استفاده شده است. از تلفیق خاصیت نورتایی ذرات دوده با روش تصویر برداری مادون قرمز، امکان تعیین توزیع کیفی ذرات دوده به عنوان عنصر اصلی تابشی شعله و خصوصیات ظاهری شعله فراهم شده است. نتایج نشان می‌دهد که هم‌سوزی گاز-گازوئیل با افزایش غلظت ذرات دوده، درخشندگی و سطح شعله را در مقایسه با حالت بدون تزریق به ترتیب 38 و 2/5 برابر افزایش می‌دهد. همچنین در نسبت هم‌سوزی گازوئیل به گاز 10% (بر مبنای جرمی)، تغییرات دمای شعله فقط 95 درجه سانتی‌گراد بوده درحالی‌که انتقال حرارت تابشی شعله 52% بهبود یافته است. علت اصلی افزایش انتقال حرارت تابشی در هم‌سوزی گاز-گازوئیل افزایش ضریب صدور تابش شعله در ناحیه مادون قرمز طیف امواج الکترومغناطیسی است. این در حالی است که تزریق قطرات گازوئیل آلاینده‌های CO و NO را در مقایسه با حالت بدون تزریق 4 و 35 ppm افزایش می‌دهد؛ اما به دلیل پایین بودن دبی جرمی تزریق، این افزایش در محدوده استاندارد آلاینده‌های خروجی قرار دارد.

## An experimental study on the effect of synchronous combustion of gas-gasoi on luminosity and radiative heat transfer of natural gas flame

Seyed Hadi Poorhoseini<sup>1</sup>, Mohammad Moghiman<sup>2\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, University of Gonabad, Mashhad, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

\* P.O.B. 9193735961 Mashhad, Iran, moghiman@um.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 13 July 2014  
Accepted 14 September 2014  
Available Online 18 October 2014

**Keywords:**  
Natural gas  
Synchronous combustion  
Gasoi spray  
Radiation heat transfer

### ABSTRACT

This is a study of the effect of synchronous combustion of gas-gasoi, achieved through the injection of gasoi droplets into natural gas flame, on the flame luminosity and radiative heat transfer. Droplets were injected by a single-hole micro-nozzle with a hole diameter of 100  $\mu\text{m}$  and injection pressure of 9 bars. A photovoltaic cell was used to determine the luminous radiation and the total radiation of flame was measured by a thermopile. Also, the combination of chemiluminescence and IR photography of flame was employed to determine the qualitative distribution of soot particles in flame. The results show that the synchronous combustion of gas-gasoi raises the soot content of flame, leading to an increase of the luminosity and volume reaction of flame 38 and 2.5 times in comparison to the non-injection mode. Also, for the synchronous combustion of gasoi and gas with a mass fraction of 10%, the flame temperature changed only 95°C, whereas the flame radiation rose as much as 52%. The improvement of flame radiation in synchronous combustion of gas-gasoi is due to the enhancement of flame emissivity coefficient in the IR region of electromagnetic wavelengths. Meanwhile, the injection of gasoi droplets increased the CO and NO pollutants by 4 ppm and 35 ppm in comparison to the non-injection mode; due to the low mass flow rate of injection, however, the increase does not exceed the allowable limit for outlet pollution.

### 1- مقدمه

غیره داشته باشد. این در حالی است که استفاده از گاز طبیعی در این تجهیزات باعث کاهش شدید راندمان حرارتی آن‌ها شده و این امر تولیدکنندگان صنعتی را با مشکلات عدیده‌ای مواجه کرده است [1-2]. انتقال حرارت تابشی یکی از مکانیزم‌های مهم انتقال حرارت در دماهای

وجود منابع عظیم گازی در کشور و مطرح بودن گاز طبیعی به عنوان سوختی پاک باعث شده تا استفاده از مشعل‌های با سوخت گاز طبیعی کاربرد فراوانی در صنایع مختلف نظیر بویلر نیروگاه‌ها، صنایع ذوب فلزات، چینی، سرامیک و

گونه‌های میانی به شدت افزایش یافته و در تمام نقاط شعله دیده می‌شوند. گونه‌های  $C_2$  و  $CH$  از تجزیه حرارتی و واکنش‌های جداسازی هیدروژن از سوخت تولید شده و افزایش آن‌ها در شعله نشان‌دهنده افزایش نرخ تجزیه حرارتی سوخت در برخورد با جبهه شعله است. آتريا [12] در خلال پژوهش‌های خود در زمینه تأثیر پیش گرمایش دما بالای هوا از طریق مخلوط کردن آن با گازهای خروجی دودکش، این روش را راهکاری مناسب برای کاهش انتشار آلایندگی هیدروژن و افزایش انتقال حرارت از شعله بیان کرد. یانگ و بلازیاک [13] در تحقیقی اثر پیش گرمایش سوخت و نیز پیش گرمایش دما بالای هوا را بر خصوصیات شعله و میزان تشکیل آلایندگی‌های شعله پروپان-هوا به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد افزایش دمای ورودی سوخت سبب کوچک شدن شعله، کاهش زمان ماند، کاهش دمای ماکزیمم شعله و کاهش نشر آلایندگی هیدروژن می‌شود.

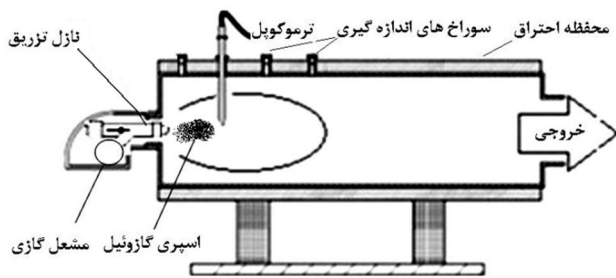
جواد و مقیمان [14] نیز در تحقیقی مشابه اثر افزایش دمای سوخت گاز طبیعی بر درخشندگی شعله و انتشار آلایندگی  $NO$  را در یک دیگ 120 کیلو واتی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده و دریافتند که با افزایش دمای سوخت از 240 تا 360 درجه سانتی‌گراد درخشندگی شعله گاز طبیعی به میزان 60% افزایش یافته و انتشار آلایندگی  $NO$  نیز به مقدار 7% کاهش می‌یابد. این در حالی است که افزایش دمای سوخت تا مقادیر کمتر از 240 درجه سانتی‌گراد تأثیر چشمگیری بر درخشندگی شعله و انتشار آلایندگی  $NO$  ندارد. بیک و همکاران [15] اثر تزریق ذرات جامد اکسید آلومینیوم و پودر زغال را بر دما و انتقال حرارت تابشی شعله هیدروژن-هوا مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که تزریق ذرات غیر واکنش دهنده اکسید آلومینیوم به شعله، باعث کاهش شار حرارتی کل بر روی دیواره کوره می‌شود و هرچه دبی تزریق ذرات بیشتر باشد این کاهش بیشتر است. اما در مورد تزریق ذرات زغال، به دلیل واکنش این ذرات در شعله و تولید دوده که از عناصر بسیار فعال و موثر در انتقال حرارت تابشی از شعله است، میزان شار حرارتی کل بر روی دیوار کوره افزایش می‌یابد. گیو و همکاران [16] در سال 2006 اثر اضافه کردن هیدروژن را بر تشکیل دوده و انتقال حرارت تابشی در شعله آرام و دیفیوژن اتیلن-هوا مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان داشتند که تزریق هیدروژن به سوخت باعث متوقف شدن و کاهش فرآیند تولید دوده می‌شود که علت آن اثر رقیق‌سازی هیدروژن است و این امر کاهش انتقال حرارت تابشی شعله را نیز به دنبال دارد. رایج‌ترین دلیلی که برای توضیح این موضوع بیان شده این است که نرخ تجزیه حرارتی وینیل به استیلین در مقایسه با نرخ ترکیب وینیل با هیدروژن و تولید مجدد استیلین و یک رادیکال هیدروژن کمتر است.

در سال 2008 ساجی و همکاران [17] به بررسی اثر تولید و اکسیداسیون دوده بر روی انتقال حرارت تابشی در شعله دیفیوژن اتیلین پرداختند. علت انتخاب اتیلین به عنوان سوخت این است که هیدروکربن‌های غیر اشباع مانند اتیلین، استیلین و بنزن نقش مهمی در تولید دوده دارند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که شعله اتیلین در مقایسه با شعله متان بزرگ‌تر و درخشان‌تر است که درخشندگی آن به دلیل حضور ذرات دوده در شعله است. همچنین با در نظر گرفتن تابش دوده دمای ماکزیمم به اندازه 150 درجه سانتی‌گراد کاهش یافته و در محدوده‌ای از شعله که این کاهش دما در آنجا رخ می‌دهد، غلظت ذرات دوده نیز بیش‌ترین مقدار را دارد. در سال 2010 اس سی پائول و ام سی پائول [1] انتقال حرارت تابشی از شعله درهم و غیر پیش آمیخته پروپان-هوا را در یک محفظه احتراق سه بعدی بررسی کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان می‌دهد که تابش از شعله‌های درخشان به

بالاست. بنابراین در مشعل‌های گازسوز صنعتی به دلیل وجود دماهای شعله بالا، سهم بزرگی از انتقال حرارت باید از طریق تابش انجام شود [3]. انتقال حرارت تابشی از شعله را می‌توان به دو دسته غیر درخشان (بخار آب و دی-اکسیدکربن) و درخشان (دوده و کربن) تقسیم‌بندی کرد. در شعله غیر درخشان گاز طبیعی دی-اکسیدکربن و بخار آب محصولات عمده و اصلی احتراق و مهم‌ترین گازهای جاذب و تشعشع کننده می‌باشند. اما این گازها باند‌های تابشی بسیار ضعیفی دارند که باعث می‌شود تا شعله گاز طبیعی انتقال حرارت تابشی بسیار پایینی داشته باشد [4-5]. شعله‌های درخشان علاوه بر دی-اکسیدکربن و بخار آب دارای ذرات دوده نیز هستند که این ذرات به عنوان جسم خاکستری با ضریب صدور بالا و نزدیک به جسم سیاه در ساختار شعله عمل کرده و انتقال حرارت تابشی از شعله را در مقایسه با شعله‌های غیر درخشان بهبود می‌بخشد [6]. بنابراین محققین به دنبال روش‌هایی هستند که از طریق افزایش موضعی غلظت ذرات دوده در درون شعله‌های غیر درخشان ضمن جلوگیری از انتشار ذرات دوده و افزایش بیش از حد مجاز آلایندگی‌های احتراق باعث بهبود درخشندگی و انتقال حرارت تابشی آن‌ها گردند. این روش راهکاری مناسب برای افزایش انتقال حرارت از شعله در کاربردهایی است که مواد دریافت کننده انرژی تابشی شعله حساسیت پایینی به تنش‌های حرارتی حاصل از افزایش انتقال حرارت از شعله به آن‌ها را داشته باشند (نظیر کوره‌های پخت سیمان).

گرین و همکاران [7] در تحقیقی روش‌های مختلف بهبود درخشندگی و افزایش غلظت ذرات دوده در شعله سوخت گاز طبیعی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها برای بهبود درخشندگی در شعله گاز، ایده استفاده همزمان از دو سوخت گاز-زغال سنگ را مطرح کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با این روش غلظت ذرات جامد دوده داخل شعله و در نتیجه درخشندگی شعله افزایش یافته است. هانتی و لی [8] در پژوهشی دیگر بهبود انتقال حرارت تابشی از شعله سوخت هیدروژن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با بررسی فرآیند تشکیل دوده توسط زغال سنگ و سهم و تأثیر آن بر انتقال حرارت تابشی از شعله، اضافه کردن پودر زغال سنگ به شعله غیر درخشان هیدروژن را برای بهبود تابش در آن پیشنهاد کردند. آن‌ها با بررسی انواع مختلف زغال سنگ دریافتند که پودر زغال سنگ نوع بیتومینوس موثرترین و مناسب‌ترین نوع زغال سنگ برای تولید دوده و در نتیجه بهبود انتقال حرارت تابشی از شعله هیدروژن است. علت این امر این است که در طی فرآیند تجزیه حرارتی این نوع زغال سنگ مقدار زیادی هیدروکربن‌های سنگین رها می‌شود. استوارت و گروز [9] به منظور بررسی تأثیر و نقش ذرات جامد در انتقال حرارت تابشی از شعله، اثر تزریق ذرات اکسید آلومینیوم و اکسید منیزیم را بر انتقال حرارت تابشی از شعله دیفیوژن متان-هوا مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که این ذرات تأثیر قابل توجهی بر انتقال حرارت تابشی از شعله ندارند. لیم و همکاران [10] دریافتند که پیش گرم کردن هوای ورودی به محفظه احتراق متان-هوا از 300 تا 560 کلون افزایش درخشندگی شعله را به دنبال داشته است. آن‌ها علت وقوع این پدیده را افزایش نرخ واکنش‌های تجزیه سوخت و جداسازی هیدروژن از متان و تشکیل دوده بیان کردند.

کیم و همکاران [11] نیز در تحقیقی اثر احتراق با هوای پیش گرم شده را بر شعله سوخت LPG به طور آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش دمای هوای ورودی (دمای پیش گرمایش)، رنگ شعله درخشان‌تر می‌شود. آن‌ها همچنین در دماهای هوای ورودی مختلف، غلظت رادیکال‌های  $C_2$  و  $CH$  را که نشان دهنده تجزیه سوخت هستند در شعله اندازه‌گیری کرده و دریافتند که با افزایش دمای هوای ورودی غلظت این



شکل 1 شماتیک کوره آزمایش و تجهیزات آن

این مکانیزم در امتداد محور مرکزی مشعل گازسوز نصب شده و گازوئیل را با فشار 9 بار به سمت نازل هدایت می‌کند. جریان سوخت بعد از عبور از نازل با قطر 100 میکرومتر و در ورود به درون شعله، به قطرات میکرونی تجزیه می‌شود. درصد جرمی هم سوزی گازوئیل در گاز طبیعی 10% است. تعیین خصوصیات ظاهری شعله توسط تصویربرداری از شعله و پردازش تصویر حاصل با نرم‌افزار متلب انجام می‌گیرد. همچنین تعیین توزیع کیفی ذرات دوده در شعله با استفاده از تکنیک تصویربرداری مادون قرمز صورت گرفته است. در این روش بر مبنای خاصیت نورتایی ذرات دوده در محدوده مادون قرمز نزدیک، از یک فیلتر مادون قرمز برای عکس‌برداری از شعله و تعیین توزیع کیفی ذرات دوده تولید شده در شعله استفاده می‌شود.

برای اندازه‌گیری درخشندگی شعله (تابش درخشانی) از یک سلول فوتولتاتیک استفاده شده است. این سلول از خانواده آشکارسازهای فوتونی و به تشعشع مرئی طیف امواج الکترومغناطیسی (طول موج‌های 0/4 تا 0/76 میکرومتر) حساس است و بنابراین می‌توان از آن برای تعیین تابش درخشانی شعله استفاده کرد [22].

برای انجام آزمایش ابتدا در حالت بدون تزریق مشعل گازسوز بر روی کوره نصب گردیده و بعد از رسیدن کوره به شرایط پایدار، اندازه‌گیری و ثبت اطلاعات آزمایش انجام گرفته است. زمان پایداری کوره 60 دقیقه است. سپس دستگاه خاموش شده و بعد از رسیدن به حالت اولیه مراحل فوق برای حالت با تزریق قطرات گازوئیل توسط مکانیزم تزریق نیز انجام پذیرفت. برای اطمینان از صحت نتایج به دست آمده آزمایش‌ها در دو نوبت تکرار شده و عدم قطعیت توسعه یافته ناشی از دقت تجهیزات اندازه‌گیری و تکرار آزمایش با سطح اطمینان 95% محاسبه و در نمودارهای مربوطه نشان داده شده است.

### 3- نتایج

شکل 2 تصویر شعله را در حالت‌های بدون تزریق و با تزریق قطرات گازوئیل به درون شعله گاز طبیعی نشان می‌دهد. مطابق شکل تزریق قطرات گازوئیل به درون شعله غیر درخشان و آبی رنگ گاز طبیعی باعث تبدیل آن به شعله-ای درخشان و زرد رنگ می‌شود. هر عنصری در اثر قرار گرفتن در شعله و سوختن، نور مخصوص به خود را ساطع می‌کند. این روش به نورتایی شیمیایی معروف بوده و از آن برای مشخص کردن ناحیه واکنش و گونه‌های موجود در شعله استفاده می‌شود [20]. این نورتایی شیمیایی برای ذرات دوده و کربن به صورت زرد رنگ است. سوخت مایع گازوئیل با فرمول شیمیایی  $C_{16}H_{29}$  جزء سوخت‌های هیدروکربنی سنگین و دارای عدد کربن بالاست. بر این اساس قطرات میکرونی گازوئیل در اثر قرار گرفتن در محیط داغ گازهای شعله عمدتاً به ذرات دوده و کربن جامد تجزیه حرارتی شده و این ذرات با نورتایی زرد خود باعث افزایش درخشندگی شعله و تغییر رنگ آن از آبی به زرد می‌شوند.

عنوان یک جسم سیاه تابع دما و ضریب جذب است و ضریب جذب در این شعله‌ها تابع غلظت دی‌اکسیدکربن، بخار آب، دوده و همچنین دماست؛ ولی دوده مهم‌ترین عنصر در ضریب جذب است. آن‌ها همچنین دریافتند که در ناحیه‌ای از شعله که غلظت دوده بیشتر است، نرخ انتقال حرارت تابشی از شعله نیز بیشتر است. در سال 2011 خاتمی و همکاران [18] با آگاهی از نقش مهم ذرات دوده در انتقال حرارت تابشی از شعله‌های درخشان، مدل‌های مختلف موجود برای ضریب صدور تابش از ذرات کربن را مورد بررسی قرار داده و یک رابطه خطی بر حسب طول موج را برای صدور تابش از ذرات کربن پیشنهاد کردند.

روش‌های پیش گرمایش دما بالای سوخت و هوا که در تحقیقات مختلف مورد بررسی قرار گرفته و به تعدادی از آن‌ها نیز اشاره شد می‌توانند با تولید ذرات دوده در شعله باعث بهبود انتقال حرارت تابشی آن شوند. اما از دیدگاه کاربردی این روش‌ها نیاز به تجهیزات گرمایشی خاص و پرهزینه نظیر کوره‌های الکتریکی دارند و این موضوع کاربرد آن‌ها را دشوار ساخته است. بنابراین راهکار مناسب و اقتصادی برای افزایش ذرات دوده در شعله و افزایش انتقال حرارت تابشی آن تزریق عناصر دودزا و کربن‌دار به شعله است. در این راستا تحقیقات انجام شده عمدتاً بر تزریق ذرات پودر زغال‌سنگ متمرکز بوده و سایر افزودنی‌هایی که می‌تواند باعث افزایش محتوای دوده در شعله گردد، مورد توجه قرار نگرفته است. در تحقیق حاضر با توجه به ارزانی نسبی و در دسترس بودن گازوئیل به عنوان سوخت جایگزین در مشعل‌های صنعتی، اثر هم سوزی گاز-گازوئیل از طریق تزریق قطرات گازوئیل به درون شعله گاز طبیعی بر روی دما، خصوصیات ظاهری شعله، درخشندگی و انتقال حرارت تابشی آن مورد بررسی قرار گرفته است.

### 2- تجهیزات آزمایشگاهی

بستر آزمایش از یک محفظه احتراق آزمایشگاهی به طول 1000 میلی‌متر و قطر 450 میلی‌متر تشکیل شده است (شکل 1).

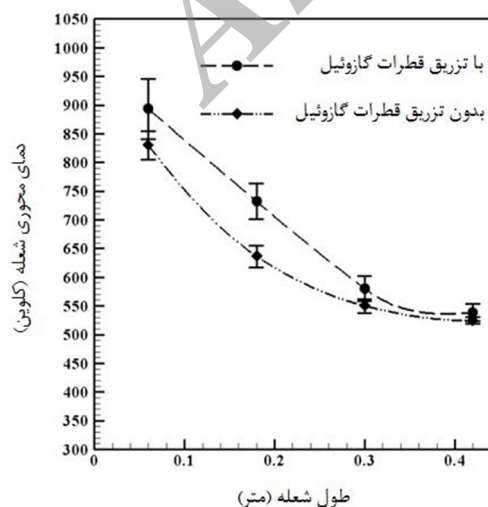
در قسمت جلو محفظه سوراخی دایروی به قطر 100 میلی‌متر برای نصب مشعل تعبیه شده است. بدنه کوره از فولاد با مقاومت در دماهای بالا ساخته شده است. برای ایجاد شعله آبی رنگ و غیر درخشان گاز طبیعی از یک مشعل گازسوز با ظرفیت حرارتی ماکزیمم صد هزار کیلوکالری بر ساعت استفاده شده است. دبی گاز مصرفی مشعل 2/94 متر مکعب در ساعت است. برای اندازه‌گیری دما و تابش شعله در راستای محور مرکزی کوره سوراخ‌هایی با فواصل 6، 18، 30 و 42 سانتی‌متر از ابتدای مشعل تعبیه شده است. اندازه‌گیری دما با استفاده از یک ترموکوپل نوع S با دقت  $\pm 2/5^\circ\text{C}$  انجام گرفته است. این ترموکوپل از خانواده ترموکوپل‌های فلزات نجیب یا پلاتینی است که از پلاتین و رودیوم ساخته شده و بیشینه دمای کارکرد آن  $1500^\circ\text{C}$  است و به دلیل دقت، قابلیت تحمل دمای بالا و عدم واکنش شیمیایی با ترکیبات موجود در شعله، در اندازه‌گیری دما در فرایندهای احتراقی کاربرد فراوان دارد [19-20].

همچنین برای اندازه‌گیری انتقال حرارت تابشی شعله از یک ترموپیل استفاده شده است. این دستگاه شامل تعدادی ترموکوپل است که جهت بالا رفتن حساسیت به صورت سری به هم متصل شده‌اند و به عنوان یک آشکارساز انتقال حرارت تابشی در محدوده دمایی  $1500-200^\circ\text{C}$  کاربرد دارد [20-21]. برای تزریق قطرات گازوئیل به درون شعله از یک مکانیزم تزریق شامل پمپ دنده‌ای، نازل و شیلنگ‌های فشار قوی رابط استفاده شده است. انرژی مورد نیاز پمپ از طریق کوپلینگ با فن تأمین هوای مشعل گازسوز تأمین می‌شود.

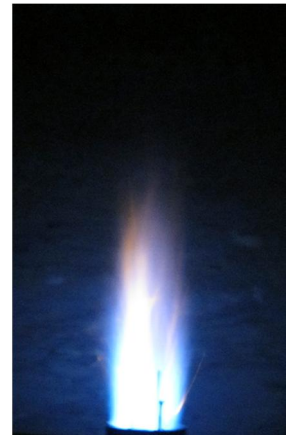
شکل 3 با استفاده از پردازش تصویر شعله با کمک نرم‌افزار متلب، یک سطح از ناحیه واکنشی شعله برای حالت بدون تزریق قطرات گازوئیل و با تزریق این قطرات به درون شعله با هم مقایسه شده است. سطح شعله در حالت با تزریق 2/5 برابر حالت بدون تزریق است. این افزایش به سبب ویژگی طولانی‌تر بودن زمان واکنش احتراق سوخت مایع گازوئیل تزریق شده نسبت به گاز طبیعی است. قطرات سوخت مایع تزریق شده ابتدا باید تبخیر شده و سپس در اثر اختلاط با هوا باعث شکل‌گیری واکنش احتراق و آزاد شدن حرارت شوند و این امر باعث می‌شود تا زمان واکنش احتراق طولانی‌تر شده و ناحیه واکنش در مقایسه با حالت بدون تزریق بزرگ‌تر و زمان ماند ذرات در ناحیه واکنش نیز بیشتر شود که این عامل باعث بهبود انتقال حرارت از شعله خواهد شد [17].

در شکل 4 با استفاده از ویژگی نورتابی شیمیایی زرد رنگ و گسیل امواج مادون قرمز نزدیک به مرئی ذرات دوده و کربن، توزیع کیفی ذرات دوده تشکیل شده در شعله در دو حالت با و بدون تزریق قطرات گازوئیل به درون شعله گاز طبیعی نشان داده شده است. در این روش با استفاده از یک فیلتر مادون قرمز از شعله تصویربرداری شده و طیف مادون قرمز نزدیک منتشر شده از شعله که متعلق به ذرات دوده و کربن جامد است با رنگ قرمز در تصویر حاصله نمایان می‌شود. مشاهده می‌شود که در حالت بدون تزریق، غلظت ذرات دوده (رنگ قرمز) تقریباً صفر است که مبین غلظت ناچیز ذرات دوده در شعله گاز طبیعی است. در حالی که با تزریق قطرات گازوئیل به درون شعله، غلظت ذرات دوده در شعله به طور چشمگیری افزایش یافته، که رنگ قرمز حاصله در تصویربرداری مادون قرمز مبین این مطلب است. این ذرات دوده از تجزیه حرارتی قطرات گازوئیل در اثر قرار گرفتن در محیط داغ گازهای درون شعله ایجاد می‌شوند.

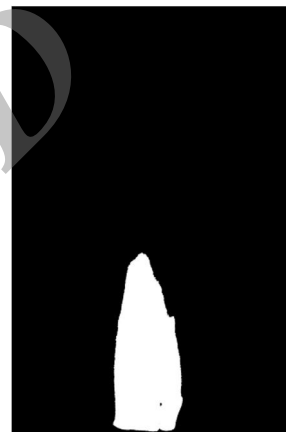
در شکل 5 مقایسه توزیع دمای محوری شعله در حالت بدون تزریق و با تزریق قطرات گازوئیل به درون شعله به تصویر کشیده شده است. مشاهده می‌شود که به طور کلی دمای شعله در حالت با تزریق نسبت به حالت بدون تزریق بیشتر است که علت آن احتراق مواد حاصل از تجزیه حرارتی قطرات گازوئیل است و آزاد شدن انرژی حرارتی حاصل از احتراق این قطرات باعث افزایش دمای شعله می‌شود. همچنین با حرکت به پایین دست شعله به دلیل کاهش غلظت قطرات سوخت مایع و تبادل حرارتی محصولات احتراق، اختلاف دمای بین حالت با تزریق و بدون تزریق کاهش می‌یابد. باید توجه داشت که به دلیل درصد جرمی پایین گازوئیل تزریق شده نسبت به گاز طبیعی (10%)، اختلاف دما در دو حالت با و بدون تزریق اندک بوده و حداکثر 15% است.



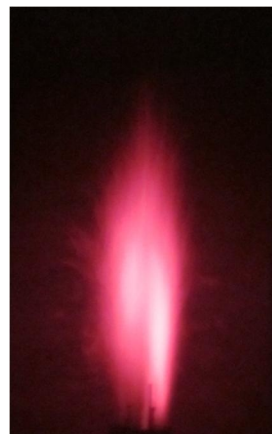
شکل 5 توزیع دمای شعله برای فواصل محوری مختلف از سر مشعل در حالت بدون تزریق و با تزریق قطرات گازوئیل



شکل 2 تصویر شعله بدون تزریق (راست) و با تزریق قطرات گازوئیل (چپ)



شکل 3 سطح واکنش شعله بدون تزریق (راست) و با تزریق قطرات گازوئیل (چپ)



شکل 4 توزیع کیفی ذرات دوده در شعله با استفاده از فیلتر مادون قرمز برای حالت بدون تزریق (راست) و با تزریق قطرات گازوئیل (چپ)

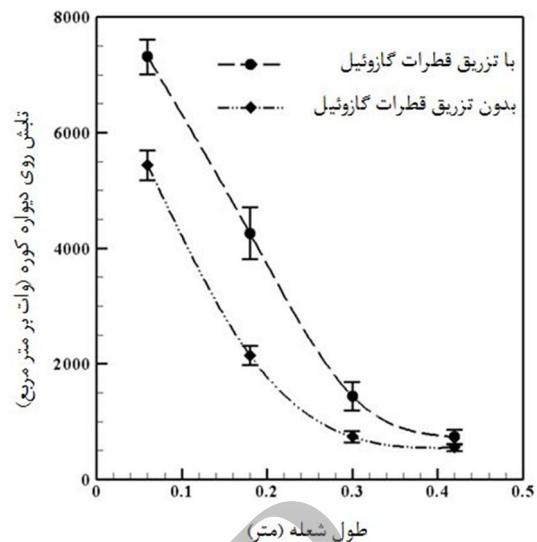
یکی از ویژگی‌های مهم شعله‌های دیفیوژن طول شعله است. به طوری که در شعله‌های دیفیوژن به دلیل نرخ اختلاط پایین‌تر سوخت و هوا طول شعله نسبت به شعله‌های پیش آمیخته بیشتر است. طول شعله در حالت بدون تزریق 14 و در حالت با تزریق 49 سانتی‌متر است. کوتاه‌تر بودن طول شعله گاز طبیعی در حالت بدون تزریق به دلیل اختلاط بهتر مخلوط گازی هوا-گاز طبیعی نسبت به مخلوط ناهمگن قطرات مایع گازوئیل و هوا در حالت با تزریق است؛ که باعث نزدیکی رفتار شعله گاز طبیعی در حالت بدون تزریق به شعله‌های پیش آمیخته (کوتاه بودن طول شعله) می‌شود.

به منظور بررسی تأثیر تزریق قطرات گازوئیل بر سطح واکنشی شعله، در

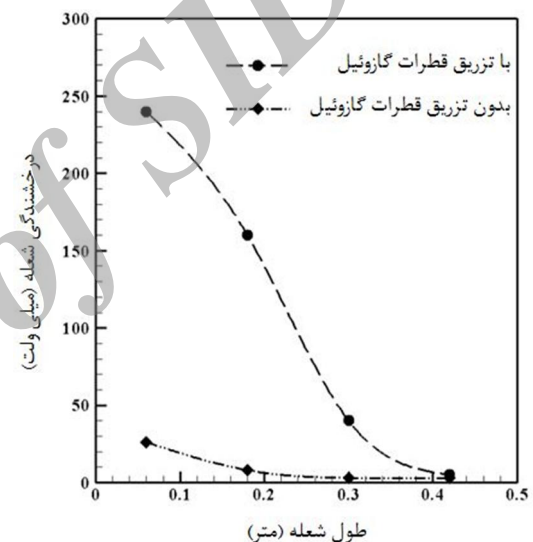
است. مشاهده می‌شود که تزریق قطرات گازوئیل به درون شعله گاز طبیعی، انتقال حرارت تابشی متوسط آن را نسبت به حالت بدون تزریق به مقدار 52% افزایش می‌دهد. شار انتقال حرارت تابشی متأثر از دو پارامتر دما و ضریب صدور تابش است. بر اساس نتایج به دست آمده از شکل 5، تزریق قطرات گازوئیل دمای متوسط شعله را نسبت به حالت بدون تزریق به میزان 8% افزایش می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که 34% از افزایش انتقال حرارت تابشی شعله در حالت با تزریق به دلیل افزایش دمای متوسط شعله بوده و 66% باقیمانده از بهبود ضریب صدور تابش شعله به دلیل افزایش غلظت ذرات دوده در آن نشأت می‌گیرد. [8-15]. ذرات دوده با جذب حرارت از شعله گرم و درخشان شده و به دلیل داشتن ضریب صدور تابش بالا در مقایسه با دی‌اکسیدکربن و بخار آب، باعث افزایش ضریب صدور تابش کلی شعله و افزایش انتقال حرارت تابشی آن می‌شوند. همچنین در ناحیه جلو شعله که غلظت ذرات دوده بیشتر است، انتقال حرارت تابشی نیز بیشتر است [1]؛ درحالی‌که با حرکت به پایین دست شعله، به دلیل کاهش غلظت ذرات دوده، انتقال حرارت تابشی نیز کاهش یافته و اختلاف بین حالت با تزریق و بدون تزریق مرتباً کاهش می‌یابد.

انتقال حرارت تابشی قسمت مرکزی طیف امواج الکترومغناطیس را که عمدتاً شامل طول موج‌های ناحیه مرئی و مادون قرمز (فرو سرخ) است به خود اختصاص می‌دهد. این دو ناحیه تابشی اصطلاحاً به تابش درخشانی و تابش حرارتی معروف هستند. در شکل 7 با استفاده از یک آشکارساز فوتوولتائیک که صرفاً به تشعشع در ناحیه مرئی طیف امواج الکترومغناطیسی حساس است؛ مؤلفه درخشانی (درخشندگی شعله) در دو حالت با تزریق قطرات گازوئیل و بدون تزریق قطرات به درون شعله گاز طبیعی اندازه‌گیری و با هم مقایسه شده است. به دلیل قطر کوچک و میکرونی نازل تزریق (100 میکرومتر)، قطرات سوخت حاصله بسیار کوچک بوده و تجزیه حرارتی آن‌ها به ذرات دوده در ناحیه جلویی شعله اتفاق می‌افتد. این امر سبب می‌شود تا در ابتدای شعله درخشندگی به شدت افزایش یابد به طوری که درخشندگی ناحیه ابتدایی شعله از مقدار 27 میلی‌ولت در حالت بدون تزریق به 240 میلی‌ولت در حالت تزریق قطرات گازوئیل به درون شعله افزایش می‌یابد. این افزایش درخشندگی از زرد سوزی ذرات دوده ناشی می‌شود. این در حالی است که با حرکت به سمت پایین دست شعله، به دلیل کاهش غلظت ذرات دوده، درخشندگی به شدت کاهش یافته و اختلاف درخشندگی دو شعله در حالت با تزریق و بدون تزریق نیز کاهش می‌یابد.

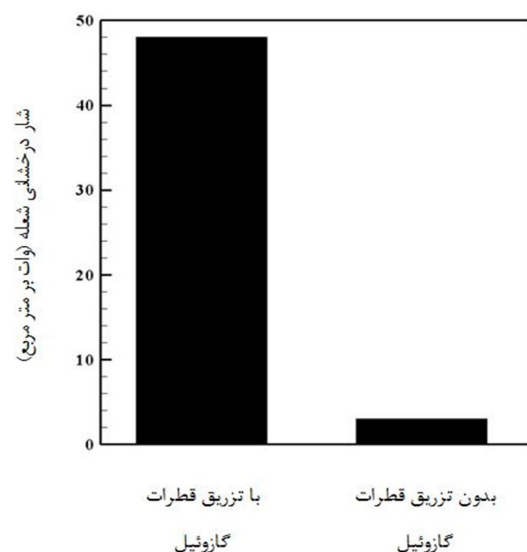
در شکل 8 متوسط تابش درخشانی شعله در دو حالت با تزریق و بدون تزریق نشان داده شده است. از مقایسه این شکل با شکل 6 که تابش کل منتشر شده از شعله را نشان می‌دهد، می‌توان دریافت که سهم مؤلفه تابش درخشانی از انتقال حرارت تابشی کل شعله، در هر دو حالت با تزریق و بدون تزریق قطرات گازوئیل به درون شعله گاز طبیعی ناچیز بوده و حداکثر 0/6% و 0/1% است. بنابراین می‌توان گفت که بهبود ضریب صدور تابش شعله در ناحیه مادون قرمز سهم عمده (66%) را در بهبود 52% انتقال حرارت تابشی شعله در حالت با تزریق دارد. همچنین افزایش دمای شعله ناشی از احتراق قطرات گازوئیل عامل 34% باقیمانده بهبود انتقال حرارت تابشی شعله در حالت با تزریق است. بر مبنای مقایسه شعله با جسم سیاه به عنوان جسم ایده‌آل در انتقال حرارت تابشی که دارای بیش‌ترین مقدار گسیل تابش در هر دما نسبت به تمام اجسام دیگر است؛ می‌توان بیان کرد که برای یک جسم سیاه با شرایط دمایی مطابق شکل 5، بیش‌ترین مقدار انرژی تابشی در محدوده فرو سرخ است. بنابراین برای بهبود ضریب صدور تابش پایین شعله



شکل 6 شار تابشی کل فرودی روی دیواره کوره با و بدون تزریق قطرات گازوئیل



شکل 7 درخشندگی شعله بدون تزریق و با تزریق قطرات گازوئیل



شکل 8 مقایسه شار تابش درخشانی شعله در حالت با و بدون تزریق گازوئیل

در شکل 6 شار تابش فرودی شعله بر روی دیواره کوره در دو حالت بدون تزریق قطرات گازوئیل و با تزریق این قطرات به درون شعله نشان داده شده

- [2] Y. E. Boke, O. Aydin, Effect of the radiation surface on temperature and  $\text{NO}_x$  emission in a gas fired furnace, *Fuel*, Vol. 88, No. 10, pp. 1878-1884, 2009.
- [3] B. W. Bulter, M. K. Denison, B. W. Webb, Radiation heat transfer in a laboratory scale pulverized coal fired reactor, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 9, 1994.
- [4] T. M. Gruenberger, M. Moghiman, P. J. Bowen, N. Syred, 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.
- [5] T. L. Farias, M. G. Carvalho, Radiative heat transfer in soot containing combustion systems with aggregation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, No. 17, pp. 2581-2587, 1998.
- [6] N. W. Bressloff, J. B. Moss, P. A. Rubini, Differential total absorptivity solution to the radiative Transfer equation for mixture of combustion gases and soot, *Numerical Heat Transfer*, Vol. 31, pp. 43-60, 1997.
- [7] A. E. S. Green, B. A. S. Green, J. C. Wagner, Radiation enhancement in oil/coal boilers converted to Natural gas, *United States Patent*, No: 5048433, 1990.
- [8] W. P. Hunty, G. K. Lee, Improved radiative heat transfer from hydrogen flames, *J. Hydrogen Energy*, Vol. 16, No. 1, pp. 47-53, 1991.
- [9] F. R. Steward, K. H. Guruz, The effect of solid particles on radiation transfer in cylindrical test furnace, in *Fifteenth International Symposium on Combustion*, Pittsburgh, The Combustion Institute, pp. 1271-1283, 1974.
- [10] J. Lim, J. Gore, R. Viskanta, A study of the effects of air preheat on the structure of methane/air Counter flow diffusion flames, *Combustion and Flame*, Vol. 121, pp. 262-274, 2000.
- [11] W. B. Kim, D. H. Chung, D. H. Yang, J. B. Noh, An experimental study on high temperature and low oxygen air combustion, *Journal of Thermal Science*, Vol. 9, No. 2, pp. 169-175, 2000.
- [12] A. Atreya, *Highly preheated combustion Aair system with/without oxygen enrichment for metal processing furnaces*, Final Technical Report for DE-FC36-02ID14348, The University of Michigan, 2006.
- [13] W. Yang, W. Blasiak, Numerical study of fuel temperature influence on single gas jet combustion in highly preheated and oxygen deficient air, *Energy*, Vol. 30, pp. 385-398, 2005.
- [14] S. M. Javadi, M. Moghiman, Experimental study of natural gas temperature effects on the flame luminosity and  $\text{NO}$  emission in a 120 kW boiler, *Fuel and Combustion Journal*, Vol. 4, No. 1, pp. 87-95, 2011. (In Persian)
- [15] S. W. Baek, J. J. Kim, H. S. Kim, S. H. Kang, Effects of addition of solid particles on thermal characteristics in hydrogen-air flame, *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 174, No. 8, pp. 99-116, 2002.
- [16] H. S. Guo, F. S. Liu, G. J. Smallwood, O. L. Gulder, Numerical study on the influence of hydrogen addition on soot formation in a laminar ethylene air diffusion flame, *Combustion and Flame*, Vol. 145, pp. 324-338, 2006.
- [17] C. B. Saji, C. Balaji, T. Sundararajan, 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.
- [18] R. Khatami, Y. A. Levendis, On the deduction of single coal Particle combustion temperature from three color optical pyrometry, *Combustion and Flame*, Vol. 158, pp. 1822-1836, 2011.
- [19] S. H. Pourhoseini, A. Saeedi, M. Moghiman, Experimental and numerical study on the effect of soot injection on  $\text{NO}_x$  reduction and radiation enhancement in a natural gas turbulent flame, *Arab J. Sci. Eng.*, in press, 2012.
- [20] C. Augustine, J. W. Tester, Hydrothermal flames: from phenomenological experimental demonstrations to quantitative understanding, *The Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 47, pp. 415-430, 2009.
- [21] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine, *Introduction to Heat Transfer*, fifth ed., pp. 400-496, New York: Wiley, 2006.
- [22] Y. H. Lia, C. Y. Wub, H. Y. Lia, Y. C. Chao, Concept and combustion characteristics of the high luminescence flame for thermo photovoltaic systems, *Proccedings of The Combustion Institute*, Vol. 33, pp. 3447-3454, 2011.

گاز طبیعی باید طول موج‌های ناحیه مادون قرمز نزدیک گسیل شده از شعله را بهبود بخشد. دی‌اکسیدکربن و بخار آب به عنوان محصولات اصلی احتراق گاز کامل و مهم‌ترین گازهای تابش کننده شعله، دارای باندهای تابشی بسیار ضعیفی در ناحیه فرو سرخ هستند و این موضوع باعث کاهش ضریب صدور تابش شعله در این ناحیه شده و افت شدید انتقال حرارت تابشی شعله را به دنبال دارد. این در حالی است که با تزریق قطرات گازوئیل به درون شعله، حضور و افزایش ذرات دوده که بر خلاف گازهای فوق دارای تابشی پیوسته و موثر در ناحیه مادون قرمز طیف امواج الکترومغناطیسی هستند، باعث افزایش ضریب صدور تابش شعله و نهایتاً افزایش نرخ انتقال حرارت تابشی شعله می‌شود.

#### 4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اثر هم سوزی گاز-گازوئیل از طریق تزریق قطرات گازوئیل به درون شعله گاز طبیعی بر ساختار شعله، درخشندگی و انتقال حرارت تابشی آن مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های اصلی این پژوهش عبارت‌اند از:

- هم سوزی گاز-گازوئیل از طریق تولید ذرات دوده در درون شعله، باعث بهبود قابل توجه انتقال حرارت تابشی پایین شعله گاز طبیعی می‌شود.
- در نسبت جرمی هم‌سوزی گازوئیل به گاز 10٪، به دلیل پایین بودن دبی تزریق گازوئیل نسبت به گاز طبیعی افزایش دمای شعله ناشی از تزریق حداکثر 15٪ است.
- در نسبت هم سوزی 10٪، 66٪ از بهبود انتقال حرارت تابشی مربوط به بهبود ضریب صدور تابش شعله و 34٪ باقیمانده ناشی از افزایش دمای شعله است.
- بهبود ضریب صدور تابش شعله در ناحیه مادون قرمز عامل اصلی بهبود انتقال حرارت تابشی شعله در حالت با تزریق است.
- سهم تابش درخشانی از انتقال حرارت تابشی کل شعله در هر دو حالت با و بدون تزریق ناچیز بوده و حداکثر 0/6٪ و 0/1٪ است.

بر اساس یافته‌های پژوهش حاضر می‌توان از راهکار علمی، اقتصادی و کاربردی هم سوزی گاز-گازوئیل از طریق تزریق قطرات گازوئیل به درون شعله گاز طبیعی، برای افزایش انتقال حرارت تابشی پایین شعله گاز طبیعی و در نتیجه افزایش راندمان حرارتی مشعل‌های گازسوز بهره گرفت. باید توجه داشت که افزایش نسبت هم سوزی به مقادیر بالاتر از 10٪ باعث افزایش غلظت آلاینده منوکسیدکربن به بیش از حد استاندارد خواهد شد.

#### 5- تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از واحد پژوهش شرکت گاز استان خراسان رضوی به عنوان حامی مالی طرح اعلام می‌دارند.

#### 6- مراجع

- [1] S. C. Paul, M. C. Paul, Radiative heat transfer during turbulent combustion process, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1-6, 2010.