



## مطالعه آزمایشگاهی اثر تزریق زغال سنگ آنتراسیت بر ساختار، انتقال حرارت تابشی، دما و راندمان حرارتی شعله دیفیوژن گاز طبیعی

سید هادی پورحسینی<sup>۱</sup>، محمد مقیمان<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد

۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد

\* مشهد، صندوق پستی ۹۱۹۳۷۳۵۹۶۱، moghiman@um.ac.ir

### چکیده

استفاده از گاز طبیعی به عنوان سوختی پاک دارای رشد روز افزون است. در بسیاری از سیستم‌های احتراق صنعتی نظیر کوره‌های صنعتی و بویلرها، سهم بزرگی از انتقال حرارت از طریق تابش انجام می‌شود و استفاده از سوخت گاز طبیعی باعث کاهش انتقال حرارت تابشی در این تجهیزات صنعتی شده و تولیدکنندگان صنعتی را با مشکلات زیادی روبرو کرده است. افزودن ذرات جامد واکنش دهنده به درون شعله، یکی از روش‌های مورد توجه محققان برای افزایش انتقال حرارت تابشی شعله‌های غیر درخشان نظیر هیدروژن و گاز طبیعی است. در تحقیق حاضر اثر تزریق ذرات پودر زغال سنگ آنتراسیت به شعله دیفیوژن یک مشعل گاز طبیعی سوزبر روی ساختار شعله، انتقال حرارت تابشی، توزیع دما و راندمان حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تزریق ذرات پودر زغال سنگ آنتراسیت به داخل شعله گاز طبیعی با افزایش ذرات جامد دوده در ساختار شعله، ضمن افزایش سطح واکنشی شعله و بهبود درخشندگی آن با افزایش ضریب صدور تابش شعله، انتقال حرارت تابشی و راندمان حرارتی آن را به ترتیب ۴۳٪ و ۲۱٪ افزایش می‌دهد. این در حالی است که تغییر دمای شعله بسیار ناچیز و حداکثر ۴۷ درجه سانتی‌گراد است.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۸ مهر ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۹ آذر ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۰۱ شهریور ۱۳۹۳

کلیدواژه‌ها:

گاز طبیعی

تزریق

ذرات زغال سنگ

انتقال حرارت تابشی

## Experimental study on the effect of coal injection on structure, radiation, temperature and thermal efficiency of natural gas diffusion flames

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

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

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

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 10 October 2013  
Accepted 30 November 2013  
Available Online 23 August 2014

### Keywords:

Natural Gas  
Injection  
Coal Particles  
Radiation Heat Transfer

### ABSTRACT

Using natural gas as a clean fuel is raising. In many industrial combustion systems, like industrial furnace and boilers, a large portion of heat transfer is done by radiation and using natural gas in these industrial systems leads to decrease in radiation heat transfer that faces the Manufacturers with many problems. The addition of solid reactant particles into the flame is one of the attractive methods that are considered by many researchers to increase the radiation heat transfer in non-luminous flame such as hydrogen and natural gas flame. In this study, the effect of coal particles injection into the natural gas diffusion flame on flame structure, radiation heat transfer, temperature profile, and thermal efficiency has been considered. The results show that the injection of coal particles into the natural gas by increasing the solid soot particles in the flame structure, increases the reaction surface and flame luminosity and with increasing the radiation emissivity coefficient, increases the radiation heat transfer and thermal efficiency 43% and 21% respectively. Whereas change in flame temperature is very low and is 47°C in its extreme limit.

### ۱- مقدمه

درخشندگی شعله بسته به مقدار ذرات جامدی است که در شعله حضور دارد. در سوخت‌های فسیلی هیدروکربنی، ذره جامدی که در ساختار شعله حضور دارد دوده یا کربن جامد است که وقتی حرارت می‌بیند شعله‌های زرد رنگ و درخشان تولید می‌کند. نرخ تولید دوده در شعله متناسب با عدد کربن سوخت است. بنابراین هیدروکربن‌های جامد و مایع سنگین به دلیل داشتن عدد کربن بالا، شعله‌های درخشان و زرد رنگ دارند؛ در حالیکه هیدروکربن‌های سبک مانند گاز طبیعی شعله‌های غیر درخشان (آبی) دارند [۳].  
در شعله غیر درخشان و آبی رنگ گاز طبیعی دی‌اکسید کربن و بخار آب

گاز طبیعی یکی از منابع اصلی تولید انرژی است که نسبت به دیگر سوخت‌های فسیلی، آلاینده کمتری تولید می‌کند [۱].  
علی‌رغم اینکه گاز طبیعی سوختی پاک می‌باشد، انتقال حرارت تابشی از شعله گاز طبیعی به طور قابل توجهی کمتر از سوخت‌های فسیلی جامد و مایع است. این در حالی است که در تجهیزات احتراق صنعتی سهم بزرگی از انتقال حرارت از طریق تابش انجام می‌پذیرد [۲].  
شعله‌ها به دو دسته درخشان و غیر درخشان تقسیم می‌شوند.

### Please cite this article using:

S.H. Poorhoseini, M. Moghiman, Experimental study on the effect of coal injection on structure, radiation, temperature and thermal efficiency of natural gas diffusion flames, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 7, pp. 163-168, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

پی جی مورد بررسی قرار دادند. آنها مدل‌های معروف تشکیل دوده شامل مدل خان گروز، مدل تسنر و مدل ماس بروکس را بررسی کرده و دریافتند که مدل ماس بروکس بیشترین توافق را با نتایج تجربی نشان می‌دهد. آنها همچنین با در نظر گرفتن سهم تابش دوده و مقایسه آن با انتقال حرارت تابشی در غیاب سهم تابش ناشی از ذرات دوده، نقش مهم دوده در میزان انتقال حرارت تابشی شعله را مورد تاکید قرار دادند.

نقش و اهمیت انتقال حرارت تابشی به عنوان مکانیزم مهم انتقال حرارت از شعله باعث شده تا مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی عناصر اصلی تابش کننده شعله‌های درخشان و غیردرخشان شامل دی‌اکسیدکربن، بخار آب و دوده مورد استفاده قرار گیرد [۱۶].

هانتی و لی [۱۷] در تحقیقی از ذرات زغال سنگ برای تولید دوده استفاده کرده و دریافتند که تزریق این ذرات باعث بهبود انتقال حرارت تابشی شعله غیر درخشان هیدروژن می‌شود.

بایک و همکاران [۱۸] نیز در تحقیقی دیگر اثر تزریق ذرات کربن جامد و اکسید آلومینیوم را بر روی شعله هیدروژن هوا مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که تزریق ذرات کربن، انتقال حرارت تابشی شعله را بهبود می‌دهد در حالیکه ذرات اکسید آلومینیوم باعث کاهش انتقال حرارت تابشی شعله می‌شوند.

وجود منابع عظیم گازی در کشور ما باعث شده تا تمایل به استفاده از گاز طبیعی به عنوان سوختی پاک و در دسترس، افزایش چشمگیری داشته باشد. به همین دلیل کاربرد مشعل‌های گازسوز در صنایع مختلف نظیر کوره‌های صنعتی ذوب فلزات، صنایع شیشه، چینی، سرامیک و بویلرها بسیار گسترش یافته است. اما در این مشعل‌ها به دلیل بالا بودن دما، تابش، مکانیزم اصلی انتقال حرارت بوده و با توجه به ضعف بودن انتقال حرارت تابشی شعله گاز طبیعی، راندمان حرارتی این مشعل‌ها پایین بوده و این امر تولیدکنندگان صنعتی را با مشکل مواجه نموده است. این درحالی است که با هدف‌مندی یارانه‌ها و واقعی شدن بهای گاز طبیعی، این مشکل نمود بیشتری پیدا کرده است. بر این اساس در این کار تحقیقاتی بر مبنای مطالعات انجام شده بر روی بهبود انتقال حرارت تابشی شعله هیدروژن که خصوصیات تابشی و ظاهری (رنگ شعله) بسیار نزدیک به گاز طبیعی دارد اثر تزریق ذرات پودر زغال سنگ آنتراسیت بر ساختار شعله، انتقال حرارت تابشی و توزیع دما در شعله دیفیوژن یک مشعل گاز طبیعی سوز بررسی شده است.

## ۲- تجهیزات آزمایشگاهی

مطالعات تجربی بر روی یک کوره آزمایشگاهی به طول ۱۰۰۰ میلی‌متر و قطر ۴۵۰ میلی‌متر انجام شده است (شکل ۱). بدنه کوره از فولاد با مقاومت در دماهای بالا ساخته شده است. مشعل نصب شده بر روی کوره یک مشعل گاز سوز با ظرفیت حرارتی ماکزیمم صد هزار کیلو کالری بر ساعت می‌باشد. دبی گاز مصرفی ۳/۸۰۴ متر مکعب در ساعت است. برای اندازه‌گیری دما و تابش شعله در راستای محور مرکزی کوره سوراخ‌هایی با فواصل ۶، ۱۸، ۳۰ و ۴۲ 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 که 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 [۱۹،۲۰]. همچنین برای اندازه‌گیری انتقال حرارت تابشی شعله از یک ترموپیل استفاده شده است.

محصولات اصلی احتراق کامل بوده و مهمترین عناصر موثر در انتقال حرارت تابشی از شعله می‌باشند. اما دی‌اکسیدکربن و بخار آب دارای باندهای انتقال حرارت تابشی بسیار ضعیفی در ناحیه مادون قرمز هستند [۳،۴].

شعله‌های درخشان علاوه بر دی‌اکسیدکربن 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 نموده و انتقال حرارت تابشی از شعله را در مقایسه با شعله‌های غیر درخشان بهبود می‌بخشند [۵،۶]. حضور ترکیبات نفتان، بنزن، استیلن، الفین و پارافین در ساختار سوخت باعث تقویت تمایل آن برای تولید دوده می‌شود [۷].

نوع شعله (پیش آمیخته و غیر پیش آمیخته) نیز پارامتر مهمی در تولید دوده است. همچنین علاوه بر مقدار کمی ذرات دوده حاضر در شعله خواص تابشی این ذرات نیز تأثیر مهمی بر روی انتقال حرارت تابشی شعله دارد [۸]. پیش‌گرمایش دما بالای هوای احتراق، یکی از روش‌های افزایش غلظت ذرات دوده در شعله، از طریق تجزیه حرارتی سوخت است [۹،۱۰]. پیش‌گرمایش دمای بالای سوخت نیز روش دیگری برای افزایش غلظت ذرات دوده در شعله‌های غیر درخشان است [۱۱].

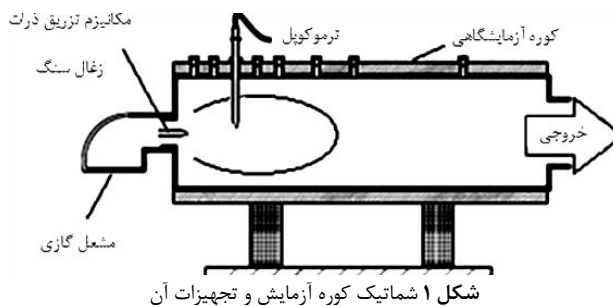
ولابن [۱۲] با تحقیقات خود نشان داد که دمای بهینه پیش‌گرمایش گاز طبیعی برای تولید دوده، ۱۱۵۰ تا ۱۱۸۰ درجه سانتی‌گراد است. در چنین دمای بالایی برخی از مولکول‌های سوخت شکسته و به کربن جامد تبدیل می‌شوند.

روش‌های مذکور پیش‌گرمایش دما بالای هوا و سوخت با افزایش غلظت ذرات دوده در شعله باعث افزایش انتقال حرارت تابشی آن می‌شوند؛ اما در عمل، این روش‌ها از لحاظ اقتصادی گران‌قیمت بوده و دارای مشکلاتی از جمله نیاز به تجهیزات گرمایشی خاص نظیر کوره‌های الکتریکی، برای انجام عمل پیش‌گرمایش دما بالا هستند. همچنین برای تبدیل شدن مولکول‌های گاز طبیعی به دوده، عمل پیش‌گرمایش علاوه بر دمای بالا باید بسیار سریع انجام شود که این موضوع بر سختی کار می‌افزاید.

با توجه به دشواری‌های روش پیش‌گرمایش سوخت و هوای ورودی به منظور افزایش انتقال حرارت تابشی شعله‌های غیر درخشان، بررسی اثر تزریق ذرات جامد مختلف در ساختار شعله بر عملکرد انتقال حرارت تابشی آن بسیار مورد توجه است. استوارت و گروز [۱۳] در تحقیقی به بررسی اثر تزریق ذرات اکسید منیزیم و اکسید آلومینیوم بر روی انتقال حرارت تابشی از شعله پیش‌آمیخته متان هوا پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که این ذرات غیر واکنش دهنده تأثیر قابل توجهی بر روی انتقال حرارت تابشی شعله ندارند.

با توجه به نقش مهم و کلیدی ذرات دوده در افزایش انتقال حرارت تابشی شعله، هیدروکربن‌های سنگین مایع و جامد در مقایسه با هیدروکربن‌های گازی سبک نظیر گاز طبیعی، فرایند شکل‌گیری، تولید و خواص ذرات دوده بر تابش شعله بیش از دیگر ذرات جامد حائز اهمیت است. سامانتا و همکاران [۱۴] اثر تزریق دی‌اکسیدکربن در سوخت گاز طبیعی را بر دمای شعله، تولید دوده و انتقال حرارت تابشی آن به صورت عددی مورد بررسی قرار داده و دریافتند که با افزایش کسر جرمی دی‌اکسیدکربن در سوخت ورودی، تولید دوده، دما و انتقال حرارت تابشی شعله کاهش می‌یابد. آنها علت این پدیده را کاهش ظرفیت حرارتی سوخت و کاهش غلظت رادیکال‌های هیدروکربنی بیان کردند.

چونگ و همکاران [۱۵] نیز در یک تحقیق به روش عددی، اثر تولید، توزیع، سهم و تأثیر تابش ناشی از ذرات دوده را در شعله دیفیوژن سوخت ال



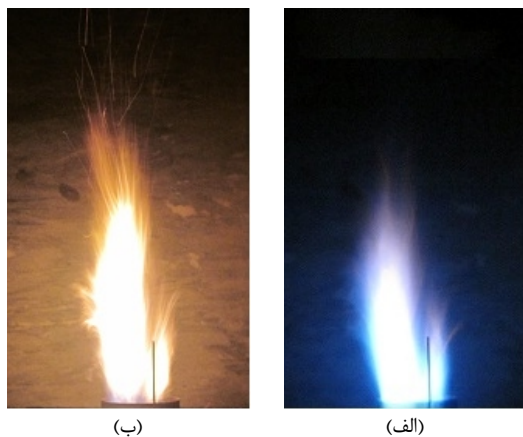
برای انجام آزمایش، ابتدا در حالت بدون تزریق مشعل گاز سوز بر روی کوره نصب گردیده و با اندازه‌گیری دبی و جریان آب ورودی به کویل مشعل روشن شد. سپس با رسیدن دمای آب خروجی کویل و نیز کوره به حالت پایدار، اندازه‌گیری و ثبت اطلاعات آزمایش انجام گرفت. زمان پایداری کوره ۴۵ دقیقه و زمان پایداری دمای آب خروجی کویل ۷ دقیقه است. همچنین به منظور جلوگیری از ورود تابش‌های مزاحم (غیر از تابش شعله) به درون ترموپیل یک صفحه سوراخ دار سرد بر روی محل اندازه‌گیری تابش، نصب و سپس اندازه‌گیری تابش انجام می‌گرفت. سپس دستگاه خاموش شده و بعد از رسیدن به حالت اولیه مراحل فوق برای حالت با تزریق ذرات زغال سنگ 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 ۹۵٪ محاسبه و در نمودارهای مربوطه نشان داده شده است.

### ۳- نتایج

شکل ۲ تصویر شعله را بدون تزریق ذرات پودر زغال سنگ و با تزریق این ذرات به درون شعله نشان می‌دهد. بین ۹۲ تا ۹۸ درصد ساختار زغال سنگ آنتراسیت را کربن جامد (دوده) تشکیل می‌دهد. هر عنصری در اثر قرار گرفتن در شعله و سوختن، نور مخصوص به خود را ساطع می‌کند. این روش به نورتابی شیمیایی معروف بوده و از آن برای مشخص کردن ناحیه واکنش و گونه‌های موجود در شعله استفاده می‌شود [۲۰]. کربن هنگام سوختن و واکنش در شعله، رنگ زردی را از خود متصاعد می‌کند. بنابراین با تزریق ذرات پودر زغال سنگ به درون شعله مشعل گاز طبیعی و افزایش غلظت ذرات دوده در شعله، تغییر رنگ آن از آبی به زرد به دلیل نورتابی شیمیایی زرد رنگ کربن مشاهده می‌شود.

در شکل ۳ با استفاده از عکس‌برداری از شعله و پردازش تصویر با کمک نرم‌افزار متلب، یک سطح از ناحیه واکنش برای حالت بدون تزریق ذرات پودر زغال سنگ و با تزریق این ذرات به درون شعله با هم مقایسه شده است. سطح شعله در حالت با تزریق نسبت به حالت بدون تزریق، ۵۰٪ بزرگ‌تر است. علت این امر این است که در حالت بدون تزریق ذرات، به دلیل اینکه گاز طبیعی و هوا مخلوط گازی همگنی را تشکیل می‌دهند، عمل اختلاط سریع‌تر و بهتر از سوخت‌های جامد و مایع صورت می‌گیرد و بنابراین ناحیه واکنش احتراق و حجم شعله کوچک است.



شکل ۲ تصویر شعله الف) بدون تزریق و ب) با تزریق ذرات زغال سنگ

این دستگاه شامل تعدادی ترموکوپل است که به منظور بالا رفتن حساسیت به صورت سری به هم متصل شده‌اند و به عنوان یک آشکارساز انتقال حرارت تابشی در محدوده دمایی  $1500-2000$  کلوین دارد [۲۰، ۲۱]. زغال سنگ مورد استفاده از نوع آنتراسیت است که دارای ۹۲ تا ۹۸ درصد کربن می‌باشد. برای تزریق ذرات پودر زغال سنگ به داخل شعله از یک مکانیزم خوراک‌دهی استفاده شده است. این مکانیزم در امتداد محور مرکزی مشعل گاز سوز نصب شده و ذرات پودر زغال سنگ را با استفاده از جریان هوای فن مشعل با دبی جرمی  $13/4$  گرم در دقیقه به داخل شعله تزریق می‌نماید. با توجه به اینکه ذرات دوده در ناحیه مرئی و نزدیک مادون قرمز تابش می‌کنند؛ از یک فیلتر مادون قرمز برای عکس‌برداری از شعله به منظور تعیین توزیع کیفی ذرات دوده تولید شده در شعله استفاده شده است. در این روش با قرار دادن فیلتر مادون قرمز در برابر یک دوربین دیجیتال و عکس‌برداری در تاریکی برای حذف نورهای مزاحم، می‌توان توزیع ذرات دوده در شعله را بر مبنای درخشندگی قرمز ایجاد شده توسط این ذرات در عکس به دست آمده، تعیین کرد.

اندازه‌گیری راندمان احتراق با استفاده از یک کویل آب انجام می‌شود. این کویل از جنس لوله مانسمان بدون درز است که جهت استفاده در دماهای بالا ساخته شده و به صورت مارپیچ فنی در مجاورت دیواره داخلی کوره قرار گرفته است. در این کویل آب سرد با دمای اولیه  $21^{\circ}\text{C}$  از یک سمت وارد شده و بعد از جذب حرارت از شعله در دمایی بالاتر از کویل خارج می‌شود. بر این اساس راندمان احتراق را با استفاده از قانون اول ترمودینامیک می‌توان به صورت رابطه (۱) بیان کرد:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{absorb}}{\dot{Q}_{in}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)  $\dot{Q}_{absorb}$  حرارت جذب شده توسط جریان آب عبوری از کویل بوده و  $\dot{Q}_{in}$  کل انرژی ورودی حاصل از دو سوخت گاز و ذرات پودر زغال سنگ می‌باشد، که از ضرب ارزش حرارتی این دو سوخت در دبی حجمی آنها محاسبه می‌شود. ارزش حرارتی گاز طبیعی ۸۱۱۷ کیلو کالری بر متر مکعب و ارزش حرارتی زغال سنگ آنتراسیت ۳۲/۵۶ مگاژول بر کیلوگرم است. همچنین  $\dot{Q}_{absorb}$  از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

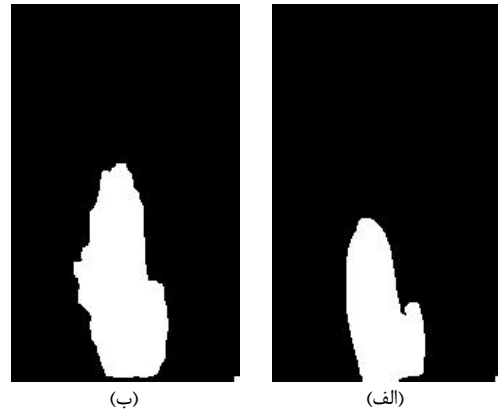
$$\dot{Q}_{absorb} = \dot{m}c\Delta T \quad (2)$$

در رابطه (۲)  $\dot{m} = 0.143 \text{ kgs}^{-1}$  دبی جرمی جریان آب عبوری از کویل،  $c = 4.184 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  ظرفیت گرمایی ویژه آب و  $\Delta T$  اختلاف دمای بین جریان آب ورودی به کویل و خروجی از آن در حالت پایدار است. برای اندازه‌گیری شدت درخشندگی شعله از یک سلول فوتولتاتیک استفاده شده است. این سلول از خانواده آشکارسازهای فوتونی است و دارای یک روکش از جنس نیمه هادی سلنیوم است که بر روی یک لایه آهن قرار گرفته و در اثر دریافت تابش و تحریک نیمه هادی یک ولتاژ ایجاد می‌کند. این سلول‌ها به تشعشعات در ناحیه مرئی طیف امواج الکترومغناطیسی حساس می‌باشند و بنابراین از آنها برای تعیین میزان درخشندگی شعله استفاده می‌شود [۲۲].

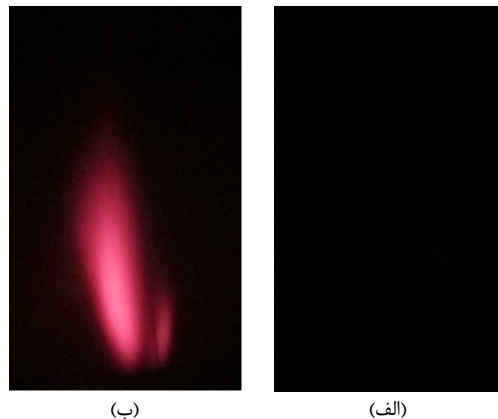
یکی از کاربردهای روش نورتایی شیمیایی تعیین و توزیع گونه‌های موجود در شعله با استفاده از نورتایی آنها در شعله است [۲۰]. ذرات دوده موجود در شعله در ناحیه مادون قرمز و نزدیک به مرئی تابش می‌کنند [۶]. در نتیجه افزایش طیف مادون قرمز شعله متناسب با افزایش غلظت ذرات دوده در ساختار شعله بوده و با این روش می‌توان توزیع کیفی ذرات دوده در شعله را تعیین کرد. شکل ۴ ردیابی و توزیع ذرات دوده در ساختار شعله، با استفاده از یک فیلتر مادون قرمز را نشان می‌دهد. این فیلتر طیف مرئی نور را حذف کرده و طیف مادون قرمز نزدیک به مرئی را از خود عبور می‌دهد. در حالت بدون تزریق ذرات پودر زغال سنگ، طیف مادون قرمز نزدیک به مرئی منتشر شده از شعله تقریباً صفر است و با توجه به اینکه این طیف مربوط به ذرات دوده است می‌توان دریافت که میزان دوده موجود در شعله بسیار ناچیز است. در صورتی که تزریق ذرات پودر زغال سنگ و تولید ذرات دوده در ساختار شعله باعث ایجاد و گسترش طیف مادون قرمز منتشر شده از شعله می‌شود. همچنین با دور شدن از ناحیه واکنشی شعله، میزان دوده تشکیل شده مرتباً کاهش می‌یابد.

شکل ۵ توزیع دمای محوری شعله را بدون تزریق ذرات پودر زغال سنگ و با تزریق این ذرات به درون شعله نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با تزریق ذرات پودر زغال سنگ به شعله، در ناحیه جلو شعله (فاصله کمتر از ۰/۱ متری روی محور افقی شکل ۵)، دما نسبت به حالت بدون تزریق کاهش می‌یابد [۲۴]. علت این امر جذب گرما توسط ذرات و تابش آنهاست. انتقال حرارت هدایت و جابجایی توسط گازهای داغ شعله به ذرات دوده، باعث افزایش شدید دمای این ذرات شده و آنها را به صورت نورانی یا درخشنده تبدیل می‌کند. سپس این ذرات به عنوان یک جسم خاکستری با ضریب صدور بالا شروع به تابش می‌کنند. اما با حرکت به سمت پایین دست شعله (فاصله بیشتر از ۰/۱ متری روی محور افقی شکل ۵)، دمای شعله در حالت با تزریق ذرات بیشتر از حالت بدون تزریق می‌شود. علت این امر این است که ذرات، بعد از جذب گرما در ناحیه جلو شعله و تجزیه حرارتی، وارد فاز احتراق می‌شوند و بنابراین این افزایش دما ناشی از احتراق ذرات دوده و پودر زغال سنگ و آزاد شدن انرژی حاصل از احتراق است. اما به هر حال به دلیل پایین بودن دبی تزریق ذرات و آزاد شدن تدریجی حرارت در فرایند احتراق ذرات جامد، تغییرات دمایی بسیار ناچیز بوده و حداکثر ۴۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

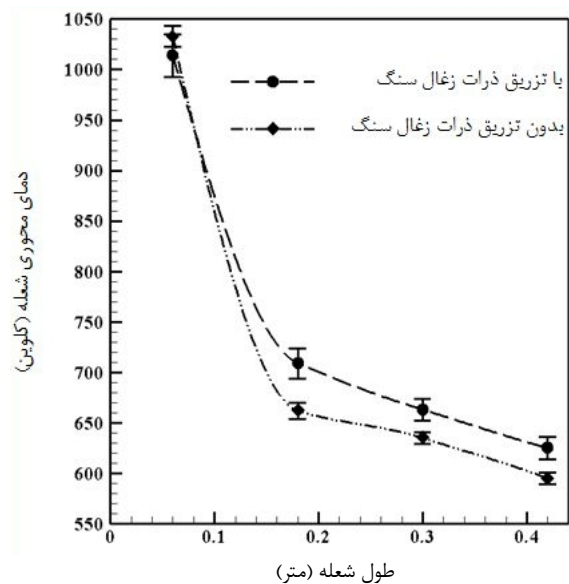
شکل ۶ شار تابشی فرودی شعله بر روی دیواره کوره را برای حالت بدون تزریق ذرات پودر زغال سنگ و با تزریق این ذرات به درون شعله نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تزریق ذرات پودر زغال سنگ به شعله گاز طبیعی، انتقال حرارت تابشی متوسط آن را نسبت به حالت بدون تزریق به مقدار ۴۳٪ افزایش داده است. شار انتقال حرارت تابشی متاثر از دو پارامتر دما و ضریب صدور تابش است. بر اساس نتایج به دست آمده از شکل ۵، به دلیل پایین بودن دبی جرمی تزریق ذرات، تغییر دمای شعله در دو حالت با تزریق ذرات زغال سنگ و بدون تزریق این ذرات بسیار کم و حداکثر ۴۷ درجه سانتی‌گراد است. بنابراین تأثیر تغییرات دمایی بر افزایش ۴۳٪ انتقال حرارت تابشی متوسط شعله، اندک بوده و عامل اصلی و تأثیرگذار بهبود و افزایش ضریب صدور تابش شعله به دلیل افزایش غلظت ذرات دوده در آن است [۱۷، ۱۸]. ذرات دوده با جذب حرارت از شعله گرم و درخشان شده و به دلیل داشتن ضریب صدور تابش بالاتر مقایسه با دی‌اکسیدکربن و بخار آب، باعث افزایش ضریب صدور تابش کلی شعله و در نتیجه افزایش انتقال حرارت تابشی شعله می‌شوند.



شکل ۳ سطح واکنش شعله (الف) بدون تزریق و (ب) با تزریق زغال سنگ



شکل ۴ توزیع کیفی ذرات دوده در شعله با استفاده از فیلتر مادون قرمز برای حالت (الف) بدون تزریق و (ب) با تزریق ذرات زغال سنگ

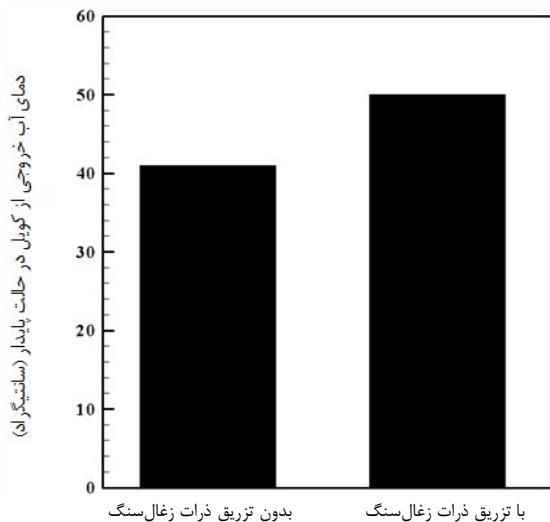


شکل ۵ توزیع دمای محوری شعله بدون تزریق و با تزریق ذرات پودر زغال سنگ

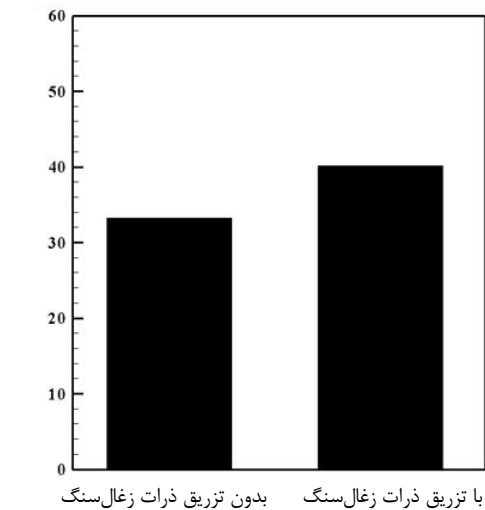
در حالی که با تزریق ذرات پودر زغال سنگ به درون شعله به دلیل جامد بودن این ذرات، ابتدا عمل تجزیه حرارتی و سپس اختلاط و احتراق آنها صورت می‌گیرد که این امر باعث می‌شود تا زمان واکنش احتراق طولانی‌تر شده و ناحیه واکنش در مقایسه با حالت بدون تزریق بزرگ‌تر و زمان ماند ذرات در ناحیه واکنش نیز بیشتر شود که این عامل باعث بهبود انتقال حرارت از شعله خواهد شد [۲۳].

شکل ۸ دمای آب خروجی از کویل را در شرایط پایدار برای حالت بدون تزریق ذرات پودر زغال سنگ و با تزریق این ذرات به درون شعله نشان می‌دهد. دمای آب خروجی از کویل در حالت پایدار، با تزریق ذرات پودر زغال سنگ ۵۰ درجه سانتی‌گراد است؛ در صورتی که این مقدار برای حالت بدون تزریق ۴۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این افزایش به دلیل بهبود انتقال حرارت تابشی شعله است. باید توجه داشت که علاوه بر تابش انتقال حرارت جابجایی نیز یکی از مکانیزم‌های انتقال حرارت از شعله است که به دلیل عدم تغییر سرعت فن مشعل و نیز تغییرات بسیار ناچیز دما (شکل ۵)، ضریب انتقال حرارت جابجایی و در نتیجه مقدار انتقال حرارت جابجایی در دو حالت با تزریق و بدون تزریق تفاوت چندانی ندارد.

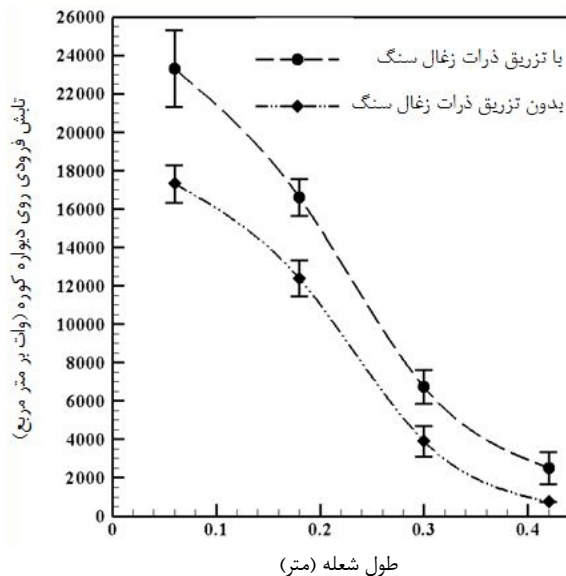
شکل ۹ راندمان حرارتی حالت بدون تزریق ذرات زغال سنگ و با تزریق این ذرات را نشان می‌دهد. علت محاسبه راندمان، کمی و لحاظ کردن تأثیر ارزش حرارتی ذرات زغال سنگ است. راندمان حرارتی در حالت بدون تزریق، ۳۳/۲٪ است؛ اما با تزریق ذرات زغال سنگ این مقدار به ۴۰/۱٪ افزایش می‌یابد. این افزایش قابل توجه در راندمان حرارتی به دلیل بهبود انتقال حرارت تابشی در نتیجه حضور و افزایش ذرات جامد دوده در شعله است.



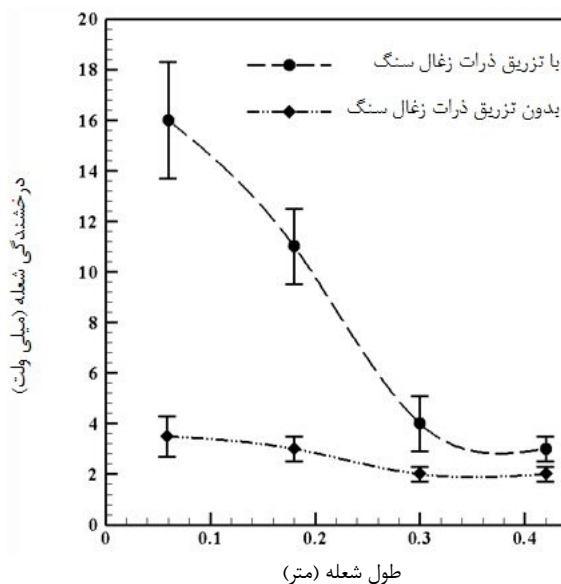
شکل ۸ دمای آب خروجی کویل در شرایط پایدار، برای حالت بدون تزریق و با تزریق ذرات پودر زغال سنگ



شکل ۹ راندمان حرارتی بدون تزریق و با تزریق ذرات پودر زغال سنگ



شکل ۶ شار تابشی فرودی روی دیواره کوره بدون تزریق و با تزریق ذرات پودر زغال سنگ



شکل ۷ درخشندگی شعله بدون تزریق و با تزریق ذرات پودر زغال سنگ

همچنین در ناحیه جلو شعله که غلظت ذرات دوده بیشتر است، انتقال حرارت تابشی نیز بیشتر است [۵]؛ در حالی که با حرکت به سمت 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.

در شکل ۷ درخشندگی شعله در دو حالت بدون تزریق ذرات پودر زغال سنگ و با تزریق این ذرات مقایسه شده است. درخشندگی متوسط شعله در حالت با تزریق ذرات پودر زغال سنگ، ۳/۷۸ برابر حالت بدون تزریق ذرات بوده و از مقدار متوسط ۲۲/۵ ولت در حالت با تزریق به ۸۵ ولت در حالت بدون تزریق رسیده است. این افزایش درخشندگی از زرد سوزی ذرات دوده ناشی می‌شود. همچنین در حالت با تزریق در ناحیه جلو شعله که غلظت ذرات دوده بیشتر است، درخشندگی به شدت بالاست. در صورتی که با حرکت به سمت پایین دست شعله به دلیل کاهش غلظت دوده، درخشندگی به شدت کاهش یافته و اختلاف درخشندگی دو شعله در حالت با تزریق و بدون تزریق نیز کاهش می‌یابد.

## ۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر اثر تزریق ذرات پودر زغال سنگ آنتراسیت بر ساختار شعله، انتقال حرارت تابشی، توزیع دما و راندمان حرارتی شعله دیفیوژن یک مشعل گاز طبیعی سوز مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های اصلی این پژوهش عبارتند از:

- تزریق ذرات پودر زغال سنگ آنتراسیت درون شعله گاز طبیعی باعث بهبود قابل توجه انتقال حرارت تابشی پایین شعله گاز طبیعی می‌شود.
- تزریق ذرات پودر زغال سنگ به داخل شعله گاز طبیعی باعث افزایش درخشندگی، سطح واکنشی شعله و نیز افزایش زمان ماند محصولات در شعله می‌شود، که به بهبود انتقال حرارت از شعله کمک می‌کند.
- با توجه به کم بودن دبی تزریق ذرات، دمای شعله با تزریق ذرات تغییر چندانی نمی‌کند؛ بلکه نقش اصلی تزریق ذرات بهبود ضریب صدور تابش شعله است.

بر اساس یافته‌های پژوهش حاضر تزریق مقادیر کم زغال سنگ آنتراسیت به شعله گاز طبیعی می‌تواند باعث بهبود قابل توجه انتقال حرارت تابشی و افزایش راندمان حرارتی در مشعل‌های گاز سوز صنعتی گردد.

## ۵- فهرست علائم

$C$	ظرفیت گرمایی ویژه آب
$\dot{m}$	دبی جرمی آب ( $\text{kg s}^{-1}$ )
$\dot{Q}$	نرخ حرارت جذب شده (kW)
$T$	دما (K)

## علائم یونانی

$\eta$	راندمان (%)
$\Delta$	تغییرات

## زیرنویس‌ها

th	حرارتی
absorb	جذب شده
in	ورودی

## ۶- 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.

## ۷- مراجع

- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] N. W. Bressloff, J. B. Moss, P.A. Rubini, Differential total absorptivity solution to the radiative Ttransfer equation for mixture of combustion gases and soot, *Numerical Heat Transfer*, Vol. 31, pp. 43-60, 1997.
- [7] K. P. Schug, Y. Manheimer, P. Yaccarino, I. Glassman, Sooting Behavior of Gaseous Hydrocarbon Diffusion Flames and the Influence of Additives, *Combustion Science and Technology*, Vol. 22, pp. 235-250, 1980.
- [8] C. L. Tien, S. C. Lee, Flame radiation, *Progress Energy Combustion Science*, Vol. 8, pp. 41-59, 1982.
- [9] J. Lim, J. Gore, R. Viskanta, A study of the effects air preheat on the structure of methane/air Ccounter flow diffusion flames, *Combustion and Flame*, Vol. 121, pp. 262-274, 2000.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] F. Wolanin, Method of natural gas firing in glass melting furnaces, *Glastechnichel*, Vol. 43, No. 2, pp. 45-49. 1970.
- [13] F. R. Steward, K. H. Guruz, The effect of solid particles on radiation transfer in cylindrical test furnace, in *Fifteenth Internatunal Symposium on Combustion*, Pittsburgh, The Combustion Institute, pp. 1271-1283, 1974.
- [14] A. Samanta, R. Ganguly, A. Datta, Effects of  $\text{CO}_2$  dilution on flame structure and soot and no formations in  $\text{CH}_4$ -air nonpremixed flames, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 132, 2010.
- [15] S. C. P.Cheung, R. K. K.Yuen, G. H. Yeoh, G. W. Y.Cheng, Contribution of soot particles on global radiative heat transfer in a two-compartment fire, *Fire Safety Journal*, Vol. 39, pp. 412-428, 2004.
- [16] R. Johansson, K. Anderson, B. Leckner, H. Thunman, Models for gaseous radiative heat transfer applied to oxy-fuel conditions in boilers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 220-230, 2010.
- [17] W. P. Hunty, G. K. Lee, Improved radiative heat transfer from hydrogen flames, *J. Hydrogen Energy*, Vol. 16, No. 1, pp. 47-53, 1991.
- [18] S. W. Baek, J. J. Kim, H. S. Kim, S. H. Kang, Effects of addition of solid particles on thermal characteristics in hydrogen flame, *Combustion Science and Technology*, Vol. 184, No. 8, pp. 99-116, 2002.
- [19] S. H. Pourhoseini, A. Saeedi, M. Moghiman, Experimental and numerical study on the effect of soot injection on Nox reduction and radiation enhancement in a natuarl gas turbulent flame, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 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.
- [23] 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.
- [24] F. Liu, H. Guo, G. J. Smallwood, O. L. Gulder, Numerical modeling of soot formation and oxidation in laminar coflow non-smoking and smoking ethylene diffusion flames, *Combust.TheoryModelling*, Vol. 7, pp. 301-315, 2003.
- [1] 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.
- [2] E. P. Keramidaa, H. H. Liakosa, M. A. Fountib, A. G. Boudouvisa, N. C. Markatos, N.C, Radiative heat transfer in natural gas-fired furnace, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 1801-1809, 2000.
- [3] 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.