ماهنامه علمى پژوهشى





mme.modares.ac.ir

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

سيد هادى پورحسينى'، محمد مقيمان'\*

۱ - دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد

۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد

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

چکیدہ	طلاعات مقاله
استفاده از گاز طبیعی به عنوان سوختی پاک دارای رشد روز افزون است. در بسیاری از سیستمهای احتراق صنعتی نظیر کورههای صنعتی بویلرها، سهم بزرگی از انتقال حرارت از طریق تابش انجام میشود و استفاده از سوخت گاز طبیعی باعث کاهش انتقال حرارت تابشی در ایز تچهیزات صنعتی شده و تولیدکنندگان صنعتی را با مشکلات زیادی روبرو کرده است. افزودن ذرات جامد واکنش دهنده به درون شعله، یکی ا روشهای مورد توجه محققان برای افزایش انتقال حرارت تابشی شعلههای غیر درخشان نظیر هیدروژن و گاز طبیعی است. در تحقیق حاضر اث تزریق ذرات پودر زغال سنگ آنتراسیتبه 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 گا 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 ۲۰٪ افزایش میدهد. این در حالی است که تغییر دما و حداکثر کرد که انتقال حرارت تابشی خانی را با منیه به دست آمده نشان می دهد که تزریق ذرات پودر زغال سنگ آنتراسیت به داخل شعله گا حداکثر کرده انتقال حرارت تابشی و راندمان حرارتی آن را به ترتیب ۴۳٪ و ۲۰٪ افزایش می دهد. این در حالی است که تغییر دمای شعله بسیار ناچیز شعله، انتقال حرارت تابشی و راندمان حرارتی آن را به ترتیب ۴۳٪ و ۲۰٪ افزایش می دهد. این در حالی است که تغییر دمای شعله بسیار ناچیز حداکثر ۲۷ درجه سانتی گراد است.	قاله پژوهشی کامل زیافت: ۱۸ مهر ۱۳۹۲ رائه در سایت: ۱۰ شهریور ۱۳۹۳ <i>ناید واژگان:</i> از طبیعی زریق رات زغال سنگ یتقال 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 consideredby 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 efficiency43% and 21% respectively. Whereas change in flame temperature is very low and is 47°C in its extreme limit.

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 می بیند شعلهای زرد رنگ و درخشان تولید می کند. نرخ تولید دوده در شعله متناسب با عدد کربن سوخت است. بنابراین هیدروکربنهای جامد و مایع سنگین به دلیل داشتن عدد کربن بالا، شعلهای درخشان و زرد رنگ دارند؛ در حالیکه هیدروکربنهای سبک مانند گاز طبیعی شعلهای غیر درخشان (آبی) دارند [۳]. در شعله غیر درخشان و آبی رنگ گاز طبیعی دی اکسیدکربن و بخار آب ۱ – مقدمه

گاز طبیعی یکی از منابع اصلی تولید انرژی است که نسبت به دیگر سوختهای فسیلی، آلاینده کمتری تولید می کند [۱]. علی غم اینکه گاز طبیعی سوختی پاک می باشد، 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 می پذیرد [۲]. شعلهها به دو دسته درخشان و غیر درخشان تقسیم می شوند.

#### Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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, U Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 7, pp. 163-168, 2014 (In Persian)

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 دی کسید کربن 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 وانتقال حرارت تابشی از شعله را در مقایسه با شعلههای غیر درخشان بهبود می بخشند [۵،۶].

حضور ترکیبات نفتالن، 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].

پیش گرمایش دما بالای هوای احتراق، یکی از روشهای افزایش غلظت ذرات دوده در شعله، از طریق تجزیه حرارتی سوخت است [۹،۱۰]. پیش-گرمایش دمای بالای سوخت نیز روش دیگری برای افزایش غلظت ذرات دوده در شعلههای غیر درخشان است [۱۱].

ولانین [۱۲] با تحقیقات خود نشان داد که دمای بهینه پیش گرمایش 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 پیش گرمایش 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 پیش گرمایش دما بالا هستند. همچنین برای تبدیل شدن مولکولهای گاز طبیعی به دوده،عمل پیش گرمایش علاوه بر دمای بالا باید بسیار سریع انجام شود که این موضوع بر سختی کار میافزاید.

با توجه به دشواریهای روش پیش گرمایش 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 پیش آمیخته 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 آنبه 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

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 وغیردرخشان شامل دی اکسیدکربن، بخار آب و دوده مورد استفاده قرار گیرد [18].

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 ضعیف 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 زوی بهبود انتقال حرارت تابشی شعله هیدروژن که خصوصیات تابشی و نظاهری (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 طبیعیسوز 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 ۲۸۰۴ متر مکعب در ساعت است. برای اندازه گیری دما و تابش شعله در راستای محور مرکزی کوره سوراخهایی با فواصل ۶، ۱۸، ۳۰ و ۴۲ سانتیمتر از ابتدای مشعل تعبیه شده است. اندازه گیری دما با استفاده از یک ترموکوپل نوع ۲ با دقت ۲۵°۲ 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 ۲°۵۰۰ است که به دلیل دقت، قابلیت تحمل دمای بالا و عدم واکنش شیمیایی با ترکیبات موجود در شعله در اندازه گیری دما در فرایندهای احتراقی کاربرد فراوان دارد [۱۹،۲۰]. همچنین برای اندازه-گیری انتقال حرارت تابشی شعله از یک ترموپیل استفاده شده است.





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 C°۱۵۰۰–۲۰۰۰کاربرد 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 ۱۳/۴ گرم در دقیقه به داخل شعله تزریق می ماید. 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، می توان توزیع ذرات دوده در شعله را بر مبنای درخشندگی قرمز ایجاد شده توسط این ذرات در عکس به دست آمده، تعیین کرد.

اندازه گیری راندمان احتراق با استفاده از یک کویل آب انجام می شود. این کویل از جنس لوله مانسمان بدون درز است که جهت استفاده در دماهای بالا ساخته شده و به صورت مارپیچ فنری در مجاورت دیواره داخلی کوره قرار گرفته است. در این کویل آب سرد با دمای اولیه C ۱°C از یک سمت وارد شده و بعد از جذب حرارت از شعله در دمایی بالاتر از کویل خارج می شود. بر این اساس راندمان احتراق را با استفاده از قانون اول ترمودینامیک میتوان به صورت رابطه (۱) بیان کرد:

$$_{\rm h} = \frac{Q_{\rm absorb}}{\dot{Q}}$$

در رابطه (۱) در  $\dot{Q}_{absorb}$  حرارت جذب شده توسط جریان آب عبوری از کویل بوده و  $\dot{Q}_{
m in}$  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 می شود. ارزش حرارتی گاز طبیعی ۸۱۱۷ کیلو کالری بر متر مکعب و ارزش حرارتی زغال سنگ آنتراسیت ۳۲/۵۶ مگاژول بر کیلوگرم است. همچنین  $\dot{Q}_{
m absorb}$  از رابطه (۲) محاسبه می شود: (٢)

$$\dot{Q}_{absorb} = \dot{m}C\Delta T$$

Jg در رابطه (۲) در معبوری از کویل،  $\dot{m} = 0.143~{
m kgs^{-1}}$  (۲) در رابطه (۲) نریان جریان C = 4.184 = C نظرفیت گرمایی ویژه آب و  $\Delta T$  اختلاف دمای بین جریان C = 4.184 = Cآب ورودی به کویل و خروجی از آن در حالت پایدار است. برای اندازه گیری شدت درخشندگی شعله از یک سلول فوتوولتاتیک 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 می کند. این سلول ها به تشعشعات در ناحیه مرئی طیف امواج الکترومغناطیسی حساس میباشند و بنابراین از آنها برای تعیین میزان درخشندگی شعله استفاده میشود [۲۲].

برای انجام آزمایش، ابتدا در حالت بدون تزریق مشعل گاز سوز بر روی کوره نصب گردیده و با اندازه گیری دبی و جریان آب ورودی به کویل مشعل روشن شد. سپس با رسیدن دمای آب خروجی کویل و نیز کوره به حالت پایدار، اندازه گیری 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 اندازه گیری تابش، نصب و سپس اندازه گیری تابش انجام می گرفت. سپس دستگاه خاموش شده و بعد از رسيدن به حالت اوليه مراحل فوق براي حالت با تزريق ذرات زغال سنگ توسط مكانيزم تزريق نيز انجام پذيرفت.

برای اطمینان از صحت نتایج به دست آمده، آزمایشها در دو نوبت تکرار شده و عدم قطعیت توسعه یافته ناشی از دقت تجهیزات، اندازه گیری و تکرار آزمایش با سطح اطمینان ٪۹۵ محاسبه و در نمودارهای مربوطه نشان داده شده است.

# 3- نتايج

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 می کند. این روش به نورتابی شیمیایی معروف بوده و از آن برای مشخص کردن ناحیه واکنش و گونههای موجود در شعله استفاده می شود [۲۰]. کربن هنگام سوختن و واکنش در شعله، رنگ زردی را از خود متصاعد میکند. بنابراین با تزریق درات 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 می گیرد و بنابراین ناحیه واکنش احتراق و حجم شعله کوچک است.



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

(1)



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 می گیرد که این امر باعث می شود تا زمان واکنش احتراق طولانی تر 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].

www.SM.ir

یکی از کاربردهای روش نورتابی شیمیایی تعیین و توزیع گونههای موجود در شعله با استفاده از نورتابی 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 استفاده از یک فیلتر مادون قرمز نزدیک به مرئی را از خود عبور می دهد. در حذف کرده و طیف مادون قرمز را نشان میدهد. این فیلتر طیف مرئی نور را منتشر شده از شعله تقریبا صفر است و با توجه به اینکه این طیف مربوط به منتشر شده از شعله تقریبا صفر است و با توجه به اینکه این طیف مربوط به 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

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 مى يابد [٢۴]. علت اين 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 می کنند. اما با حرکت به سمت پایین دست شعله (فاصله بیشتر از ۱/۰ متری روی محور افقی شکل ۵)، دمای شعله در حالت با تزریق ذرات بیشتر از حالت بدون تزریق می شود. علت این امر این است که ذرات، بعد از جذب گرما در ناحیه جلو شعله و تجزیه حرارتی، وارد فاز احتراق می شوند 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 سانتی گراد می-ىاشد.

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 می-دهد. 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 سانتی گراد 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]. فریب صدور تابش بالادر مقایسه با دیاکسیدکربن و بخار آب، باعث افزایش ضریب صدور تابش کلی شعله و در نتیجه افزایش انتقال حرارت تابشی درات دوده با جذب حرارت از شعله گرم و درخشان شده و به دلیل داشتن



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 مرتبا کاهش می-یابد.

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.

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 سانتی گراد است؛ در صورتی که این مقدار برای حالت بدون تزریق ۴۱ درجه سانتی گراد 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 جابجاییدر 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



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

#### 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 طبیعیسوز 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 می شود.

- تزریق ذرات پودر زغال سنگ به داخل شعله گاز طبیعی باعث افزایش
 درخشندگی، سطح واکنشی شعله و نیز افزایش زمان ماند محصولات در شعله
 می شود، که به بهبود انتقال حرارت از شعله کمک می کند.

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 علايم

С	ظرفیت گرمایی ویژه آب
ṁ	دبی جرمی آب (kgs <sup>-1</sup> )
Q	نرخ حرارت جذب شده (kW)
Т	دما (K)
علايم يونانى	
η	راندمان (٪)
Δ	تغييرات
زيرنويسها	
th	حرارتى
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

- Y. E. Boke, O. Aydin, Effect of the radiation surface on temperature and NO<sub>x</sub> 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.

- [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 co<sub>2</sub> dilution on flame structure and soot and no formations in ch<sub>4</sub>-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 quantitive 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, *Proceedings 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. Theory Modelling*, Vol. 7, pp. 301-315, 2003.