

## اندازه‌گیری آزمایشگاهی اثر افزایش دمای سوخت گاز طبیعی بر درخشندگی شعله و انتشار آلاینده NO در یک دیگ ۱۲۰ کیلوواتی

سید محمد جوادی \* و محمد مقیمان \*\*

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

(دریافت: ۱۳۸۹/۹/۳۰، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۰/۳/۷، پذیرش: ۹۰/۳/۳۱)

درخشندگی شعله نقش مهمی بر انتقال حرارت تابشی و افزایش بازده دیگ‌ها (آب گرم یا بخار) دارد. یکی از روش‌های مهم افزایش درخشندگی شعله‌ها افزایش محتوای دوده در شعله است. در این مقاله، اثر پیش‌گرم کردن سوخت گاز طبیعی (به‌عنوان یکی از روش‌های افزایش تجزیه حرارتی سوخت) بر افزایش شدت درخشندگی شعله و بازده دیگ مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است. مطالعات روی یک دیگ ۱۲۰ کیلوواتی که گاز ورودی به مشعل آن با گرمکن‌های الکتریکی پیش‌گرم می‌شود انجام شده است. برای اندازه‌گیری تابش شعله از دستگاه پیرانومتر و برای اندازه‌گیری دما و گازهای احتراقی از دستگاه Testo350XL استفاده شده است. برای انجام مطالعات، سوخت گاز ورودی تا دمای  $300^{\circ}\text{C}$  پیش‌گرم شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش دمای سوخت ورودی تا دمای حدود  $240^{\circ}\text{C}$  تاثیر چشمگیری بر درخشندگی ندارد، اما در دماهای بالای  $240^{\circ}\text{C}$ ، به علت افزایش تجزیه گاز و آزاد شدن مولکول‌های کربن، درخشندگی شعله به شدت افزایش می‌یابد. نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهد با افزایش دمای سوخت ورودی از  $240^{\circ}\text{C}$  تا  $300^{\circ}\text{C}$  شدت تابش درخشندگی ۶۰ درصد افزایش می‌یابد که این موجب کاهش ۱۰ درصدی در دمای بیشینه شعله و کاهش ۷ درصدی در انتشار آلاینده NO می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج دیگر محققان در پیش‌گرم کردن سوخت توافق مطلوبی را نشان می‌دهد.

**کلیدواژه:** پیش‌گرمایش سوخت، درخشندگی شعله، دمای بیشینه، انتشار اکسید نیتروژن

### مقدمه

در دیگ‌های صنعتی با شعله نفوذی، به دلیل برخورد سوخت ورودی با گازهای داغ در ابتدای شعله و شکستن زنجیره سوخت و جدا شدن اتم‌های هیدروژن از آن و تشکیل گونه‌هایی مانند  $\text{C}_2$ ،  $\text{CH}_3$  و  $\text{CH}_2$  میزان درخشندگی شعله به‌ویژه در ابتدای آن بسیار بالاست [۱]. در این شعله‌ها که اغلب در دیگ‌های صنعتی با ظرفیت بالا استفاده می‌شوند، تابش‌های حرارتی و درخشانی شعله‌ها نقش مهمی در انتقال حرارت داخل محفظه احتراق دارند [۲]. تابش درخشانی شعله ارتباط زیادی به مقدار کربن‌های موجود در مولکول سوخت دارد به طوری که در سوخت‌های سبک مانند گاز طبیعی تابش درخشانی و در نتیجه انتقال حرارت تابشی پایین است [۳]. لذا جایگزینی سوخت گاز طبیعی به جای سوخت مایع در دیگ‌های صنعتی، به علت پایین بودن تعداد اتم‌های کربن نسبت به هیدروژن در سوخت گاز طبیعی، تابش درخشانی و در نتیجه انتقال حرارت تابشی را به شدت کاهش داده که این موجب افزایش دمای گازهای دودکش و در نتیجه اتلاف انرژی می‌شود [۳]. بر اساس مطالعات ویسکنتاس و همکارانش گازهای داغ  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{O}$  نقش مهمی در تابش حرارتی و ذرات دوده اهمیت زیادی بر تابش درخشانی و انتقال

\* دانشجوی دکتری - نویسنده مخاطب (ایمیل: Mohammad.javadi@gmail.com)

\*\* استاد (ایمیل: mmoghiman@yahoo.com)

حرارت ناشی از آن دارد [۱]. از آنجا که در شعله‌های گاز طبیعی، به علت پایین بودن تعداد ذرات دوده، درخشندگی شعله قابل توجه نیست، بسیاری از محققان روش‌های مختلف افزایش دوده در شعله سوخت گازی و افزایش درخشانی آن را مطالعه کردند. از جمله روش‌های مورد استفاده می‌توان به روش تزریق سوخت مایع و جامد [۳] و ایجاد میدان الکتریکی با تواترهای (Frequency) مختلف [۴] اشاره کرد. همچنین، مطالعات محققان در زمینه اثرات پیش‌گرمایش هوا بر ساختار شعله نشان می‌دهد که افزایش دمای هوای ورودی موجب افزایش دمای شعله و در نتیجه افزایش تجزیه حرارتی سوخت ورودی به دیگ در اثر برخورد با شعله می‌شود [۵-۶]. مندل و همکارانش اثر پیش‌گرمایش هوا را بر میزان تشکیل دوده و انتشار NO در شعله نفوذی آرام سوخت متان بررسی کردند و مشاهده کردند با افزایش دمای هوا از  $300^{\circ}\text{K}$  تا  $400^{\circ}\text{K}$  میزان دوده تشکیل شده در شعله تا  $3/5$  برابر افزایش می‌یابد [۵]. همچنین، لیم و همکارانش، با پیش‌گرم کردن هوای ورودی به محفظه احتراق متان-هوا از  $300^{\circ}\text{K}$  تا  $560^{\circ}\text{K}$ ، مشاهده کردند غلظت اتم‌های هیدروژن داخل محفظه احتراق افزایش چشمگیری یافته که علت آن را افزایش نرخ واکنش‌های تجزیه سوخت و جداسازی هیدروژن از متان بیان کردند [۶].

چنانچه هوای ورودی به محفظه احتراق تا دماهای بیش از  $1000^{\circ}\text{C}$  پیش‌گرم شود، این سیستم به‌عنوان HiTAC (High Temperature Air Combustion) شناخته می‌شود [۷] که هدف آن از پیش‌گرمایش دمای بالای هوا افزایش پایداری شعله و امکان کاهش غلظت اکسیژن ورودی تا حدود ۵ درصد است. کیم و همکارانش با اندازه‌گیری گونه‌های  $\text{CH}$ ،  $\text{C}_2$  و  $\text{OH}$  به مطالعه آزمایشگاهی اثر دمای هوای ورودی (از  $30^{\circ}\text{C}$  تا  $1000^{\circ}\text{C}$ ) و غلظت اکسیژن موجود در آن (از ۵ تا ۲۱ درصد) بر ساختار شعله در سیستم HiTAC پرداختند [۷]. عکس‌برداری‌های آن‌ها از شعله سیستم HiTAC نشان داد که در اثر افزایش دمای هوای ورودی غلظت گونه‌های  $\text{CH}$  و  $\text{C}_2$  به دلیل افزایش نرخ واکنش‌های تجزیه حرارتی سوخت هیدروکربنی در شعله افزایش می‌یابند [۷]. یکی از روش‌های افزایش نرخ تجزیه حرارتی سوخت پیش‌گرمایش آن است [۸-۹]. یانگ و همکارانش همراه با پیش‌گرمایش هوا به مطالعه اثرات پیش‌گرمایش سوخت ورودی (گاز پروپان) بر دمای بیشینه شعله و انتشار آلاینده NO برای مقادیر مختلف اکسیژن ورودی پرداختند [۹]. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش دمای سوخت ورودی دمای بیشینه شعله و انتشار آلاینده NO حرارتی کاهش می‌یابد. کاهش دمای بیشینه شعله می‌تواند به دلیل افزایش درخشندگی شعله در اثر تشکیل ذرات کربنی و افزایش انتقال حرارت تابشی صورت گرفته باشد. از آنجا که اثرات پیش‌گرمایش سوخت بر مشخصات و ساختار شعله به وسیله تعداد محدودی از محققان مطالعه شده است، در این مقاله جزئیات بیشتری از اثرات پیش‌گرمایش سوخت بر بازده حرارتی دیگ، دما و تابش شعله و همچنین انتشار آلاینده‌های CO و NO در یک دیگ ۱۲۰ کیلوواتی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی قرار گرفته است.

## تجزیه حرارتی گاز طبیعی و اثر آن بر تابش شعله

دو محصول اصلی تجزیه حرارتی گاز طبیعی کربن جامد و گاز هیدروژن است [۱۰]:



سرعت واکنش بالا و تشکیل ذرات کربن حاصل از آن بستگی زیادی به دمای واکنش داشته و با افزایش دما افزایش می‌یابد. در داخل دیگ، ذرات کربن تولیدشده اکسید می‌شوند و بیشتر آن‌ها به CO تبدیل می‌شوند. نتایج محققان نشان می‌دهد حتی وجود مقادیر بسیار کمی از کربن جامد (در حد ۱۰ ppm) در شعله سبب افزایش شدید تابش درخشانی شعله و کاهش انتشار آلاینده NO می‌شود [۱۱-۱۲]. حضور ذرات کربن در شعله موجب افزایش ضریب انتشار و افزایش تابش شعله می‌شود. در مدل‌های توسعه‌یافته، برای محاسبه اثر کربن جامد بر تابش شعله، ضریب جذب اصلاح‌شده‌ای برای مخلوط گازهای احتراقی حاوی کربن به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۳]:

$$a_m = a_{\text{gas}} + a_{\text{soot}} \quad (2)$$

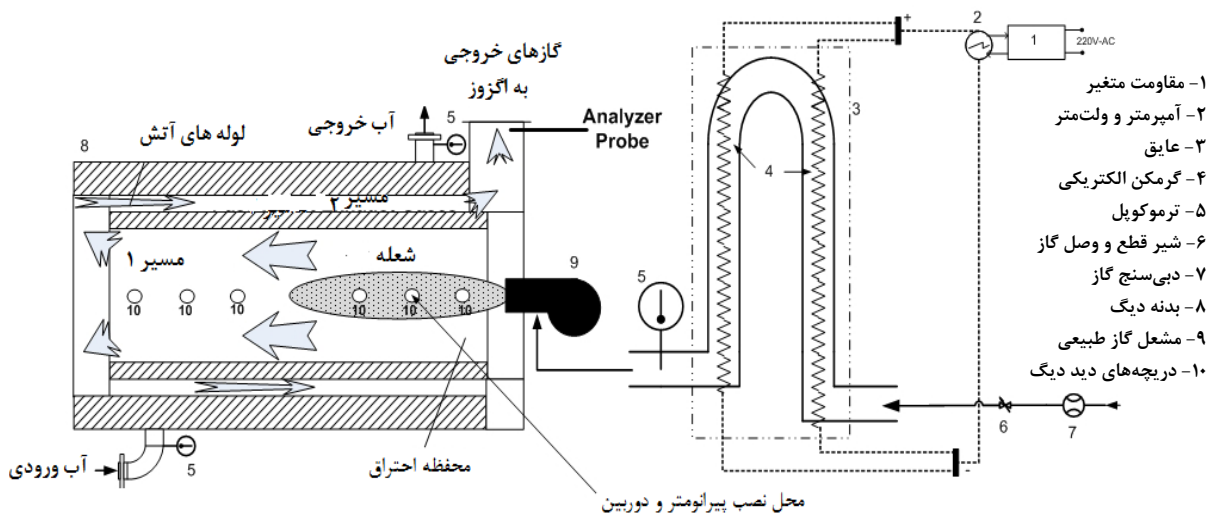
در این رابطه، ضریب جذب مخلوط گازهای احتراقی بدون اثر کربن جامد است که از مدل WSGGM (Weighted Sum of Gray Gases Model) قابل محاسبه است [۱۳]. همچنین، ضریب جذب ذرات کربن است که بر حسب دما و کسر جرمی ذرات آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$a_{soot} = b_1 \rho m_s [1 + b_T (T - 2000)] \quad (3)$$

که در آن  $b_1 = 1232.4 \text{ m}^2/\text{kg}$  و  $b_T = 4.8 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  ثابت‌های تجربی،  $\rho$  چگالی مخلوط گازی و  $m_s$  کسر جرمی دوده است [۱۳]. این افزایش ضریب جذب و نشر شعله موجب افزایش انتقال حرارت تابشی و در نتیجه کاهش دمای شعله می‌شود. با توجه به وابستگی شدید NO حرارتی به دمای بیشینه شعله، کاهش دمای شعله سبب کاهش شدید انتشار NO می‌شود.

### بستر آزمایش و روش آزمون

مطالعات آزمایشگاهی بر روی یک دیگ ۱۲۰ کیلوواتی با سوخت گاز طبیعی انجام شده است. محفظه احتراق دیگ دارای قطر ۴۰۰ mm و طول ۱۵۰۰ mm است. در شکل (۱) بستر آزمایش شامل مشعل، ساختمان داخلی دیگ، سیستم گرمایش گاز و تجهیزات اندازه‌گیری نشان داده شده است. دیگ از نوع دومسیره است که براساس استاندارد DIN EN676 طراحی و ساخته شده است [۱۴]. مشعل مورد استفاده از نوع مشعل‌های گازسوز دمنده‌دار خودکار است که ظرفیت حرارتی آن بین ۶۰ تا ۱۲۰ کیلووات، بر حسب دبی سوخت و هوای ورودی، قابل تنظیم است. سوخت ورودی از یک لوله افقی به قطر ۱۰ mm و هوای ورودی از یک ناحیه حلقوی بین لوله سوخت و لوله هم‌مرکز با آن با قطر داخلی ۱۰۰ mm وارد محفظه احتراق می‌شود. جهت اختلاط سوخت و هوا، در دهانه خروجی مشعل از یک شعله‌پخش‌کن با زاویه چرخش ۴۵ درجه استفاده شده است. با توجه به نحوه ورود سوخت و هوا، نوع شعله از نوع شعله‌های نفوذی آشفته است.



شکل ۱- سیستم گرمایش گاز ورودی (سمت راست) و مجموعه دیگ آب گرم (سمت چپ)

برای پیش‌گرم کردن گاز ورودی به دیگ، از چهار المنت الکتریکی که در داخل و خارج لوله U شکل گاز قرار گرفته‌اند استفاده شده است (شکل ۱). توان الکتریکی بیشینه المنت‌ها ۴ کیلووات بوده که امکان افزایش دمای گاز تا  $500^\circ\text{C}$  را میسر کرده‌اند. برای اندازه‌گیری دمای گاز از یک ترموکوپل و برای اندازه‌گیری غلظت محصولات احتراق و دما از دستگاه آنالیز گاز Testo 350XL استفاده شده است. پروب نمونه‌برداری استاندارد دستگاه به طول ۷۰۰ mm و تحمل دمایی  $1000^\circ\text{C}$  دارای

ترموکوپل نوع K و دارای شلنگ مخصوص گاز  $SO_2/NO_2$  است. این دستگاه گونه‌های  $O_2$ ، CO و NO را به طور مستقیم توسط حسگر اندازه‌گیری و گونه  $CO_2$  را بر حسب درصد اکسیژن اندازه‌گیری شده محاسبه می‌کند [۱۸]:

$$CO_2 = CO_{2max} \frac{20.94\% - O_2[\%]}{20.94\%} \quad (۴)$$

که مقدار  $CO_{2max}$  برای سوخت گاز طبیعی ۱۱/۷ است [۱۵]. درصد هوای اضافه نیز براساس نوع سوخت ورودی و مقادیر گونه‌های  $O_2$ ، CO و  $CO_2$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$\lambda = Excess\ Air = 100 \frac{O_2 - \frac{CO}{2}}{0.2682(100 - O_2 - CO_2 - CO) - \left(O_2 - \frac{CO}{2}\right)} \quad (۵)$$

که در آن غلظت کلیه گونه‌ها بر حسب درصد است. در محدوده اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در این مقاله، دقت حسگرهای کالیبره‌شده مختلف دستگاه در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات حسگرهای دستگاه Testo350XL برای اندازه‌گیری محصولات احتراق [۱۵]

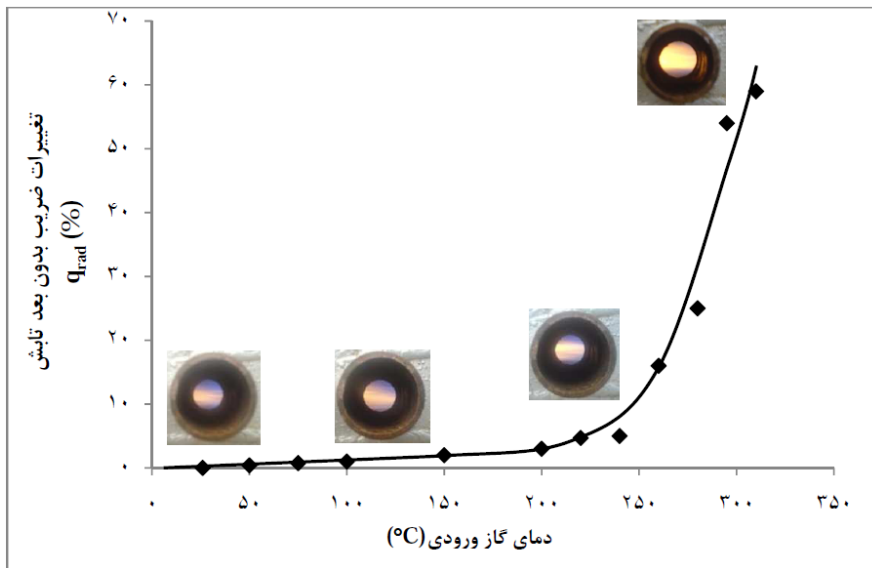
دقت دستگاه در محدوده مورد استفاده	گستره اندازه‌گیری	گازهای اندازه‌گیری شده
$\pm 0.4^\circ C$	$0 - 200^\circ C$	دما
$\pm 1.0^\circ C$	$200 - 900^\circ C$	
$\pm 0.2^\circ C$	$0 - 25\%$	$O_2$
$\pm 10\text{ ppm}$	$0 - 10000\text{ ppm}$	CO
$\pm 8\text{ ppm}$	$0 - 3000\text{ ppm}$	NO
$0.1\%$	----	درصد هوای اضافه (محاسباتی)

همچنین، برای اندازه‌گیری دما در نقاط مختلف داخل دیگ هفت درجه استوانه‌ای روی بدنه آن در نظر گرفته شده است که امکان ورود پروب ترموکوپل و اندازه‌گیری دما را میسر می‌سازد. برای اندازه‌گیری دمای محوری دیگ از یک دماسنج نوع S با غلاف سرامیکی با حداکثر دمای قابل اندازه‌گیری  $200^\circ K$  و دقت  $1^\circ K$  استفاده شده است. همچنین، برای اندازه‌گیری دمای گاز ورودی از یک دماسنج با محدوده اندازه‌گیری دما از صفر تا  $500^\circ C$  و دقت  $5^\circ C$  استفاده شده است. برای ارزیابی شدت درخشندگی شعله از یک دستگاه پیرانومتر با حسگر فتوولتاییک [۱۶] با قابلیت اندازه‌گیری طیف تابشی  $300$  تا  $1100$  نانومتر که در محدوده طیف غالب تابش مرئی شعله‌های درخشنده است [۱۷] و یک دوربین جهت عکس‌برداری از شعله استفاده شده که محل نصب آن‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. کلیه عکس‌ها با زمان نوردهی ثابت  $0.05$  ثانیه گرفته شده است. ابتدا، در حالت بدون پیش‌گرمایش گاز ورودی، مقدار سوخت و هوای مشعل تنظیم شده و پس از رسیدن مجموعه دیگ و تجهیزات اندازه‌گیری به شرایط پایدار دمایی مقادیر دما و غلظت محصولات احتراق داخل دودکش و دمای شعله اندازه‌گیری شده است. سپس، با استفاده از گرم‌کن‌های الکتریکی و کنترل توان آن‌ها آزمایش برای دماهای مختلف سوخت ورودی تکرار شده است. همچنین، میزان تابش شعله (ناشی از درخشندگی آن) برای دماهای مختلف سوخت ورودی با استفاده از دستگاه پیرانومتر اندازه‌گیری و تصاویر شعله نیز در دماهای مختلف ثبت شده است. جهت اطمینان از رسیدن مجموعه دیگ به شرایط پایدار و تکرارپذیری اندازه‌گیری‌ها، در هر آزمایش مقادیر متغیرهای مختلف در فواصل  $15$  دقیقه اندازه‌گیری شده و پس از اطمینان از رسیدن دیگ و تجهیزات اندازه‌گیری به شرایط پایدار مقادیر آن‌ها ثبت و گزارش شده است. به منظور بررسی تکرارپذیری آزمایش و جلوگیری از هر گونه انحراف و خطای احتمالی در اندازه‌گیری‌های اولیه، اندازه‌گیری‌های دما مجدداً انجام شده و بیشترین اختلاف مشاهده شده نسبت به مقادیر متوسط آن‌ها حدود  $10$  درصد بوده است. شایان ذکر است در

تمام آزمایش‌های انجام شده دبی جرمی گاز ورودی ۵/۶ کیلوگرم بر ساعت و درصد هوای اضافه ۱۳/۹ درصد ثابت نگه داشته شده است.

## نتایج

در آزمایش‌های انجام شده، با افزایش دمای سوخت از ۲۷°C تا ۳۱۰°C تغییر درخشندگی شعله، غلظت گونه‌های مختلف و دمای محصولات احتراق داخل دودکش بررسی شده‌اند. در شکل (۲) اثر دمای گاز ورودی به دیگ بر شدت تابش و نیز نتایج عکس‌برداری نشان داده شده است. عکس‌های ارائه شده نشان می‌دهند با افزایش دمای گاز ورودی درخشندگی شعله افزایش چندانی نداشته است، اما برای دمای سوخت ۲۴۰°C به بالا شدت درخشندگی شعله به شدت افزایش می‌یابد.



شکل ۲- اثر دمای ورودی بر تابش شعله و نتایج عکس‌برداری از درخشندگی شعله

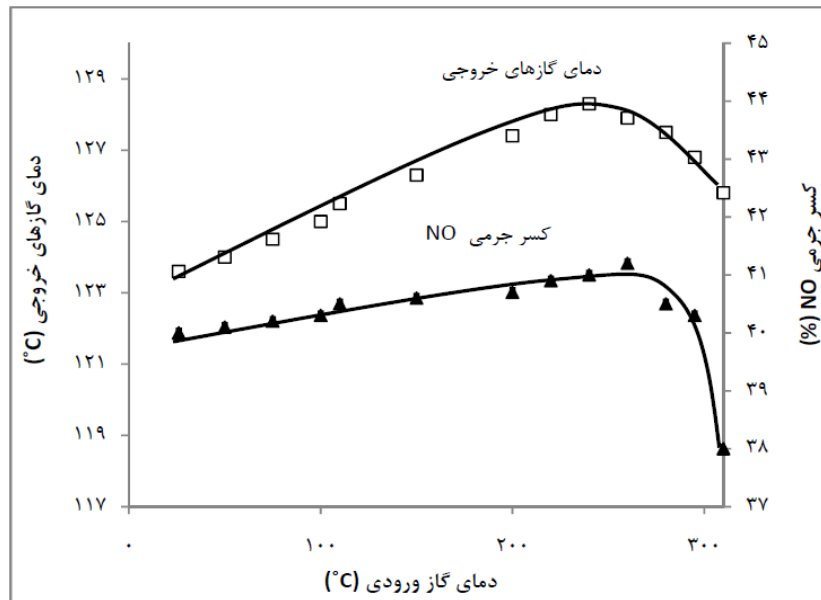
برای بررسی میزان افزایش درخشندگی شعله با افزایش دمای سوخت و در نتیجه افزایش تابش ناشی از آن، از متغیر بدون بعد  $q_{rad}$  که به صورت زیر تعریف شده است استفاده می‌شود:

$$q_{rad} = (\dot{Q}_T - \dot{Q}_0) / \dot{Q}_0 \quad (۶)$$

که در آن  $\dot{Q}_T$  و  $\dot{Q}_0$  به ترتیب مقادیر تابش اندازه‌گیری شده توسط دستگاه پیرانومتر در دمای اولیه گاز ورودی (۲۷°C) و در دمای گاز ورودی T می‌باشند. مقادیر بدون بعد  $q_{rad}$  اندازه‌گیری شده در دیگ نشان می‌دهد برای ایجاد درخشندگی مطلوب در گاز طبیعی به روش پیش‌گرمایش سوخت لازم است گاز ورودی به دیگ بیش از ۲۴۰°C پیش‌گرم شود. در پیش‌گرمایش مستقیم سوخت، بخشی از حرارت مورد نیاز برای تجزیه سوخت به طور مستقیم به سوخت داده می‌شود و بخش دیگر در اثر برخورد مولکول‌های سوخت با جبهه شعله حاصل می‌شود. لذا تاثیر بیشتر پیش‌گرمایش سوخت در واکنش‌های رخ داده در شعله است که نرخ واکنش تجزیه حرارتی سوخت را نسبت به سایر واکنش‌ها افزایش می‌دهد. نتایج ژوکوف و همکارانش هم نشان می‌دهد پیش‌گرم کردن گاز طبیعی تا ۲۰۰°C اثر چشمگیری بر افزایش درخشندگی شعله گاز طبیعی نداشته و دمای شعله را افزایش می‌دهد [۱۸].

در شکل (۳)، اثر دمای گاز ورودی بر دمای محصولات احتراق و آلاینده NO داخل دودکش نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در دمای گاز ورودی بیش از ۲۴۰°C، به دلیل افزایش تابش درخشانی شعله (شکل ۲)، دمای دودکش و میزان

انتشار آلاینده NO کاهش ناگهانی می‌یابند. نتایج یانگ و بلاسیاک نیز کاهش انتشار NO حرارتی در اثر پیش‌گرمایش دمای گاز ورودی (پروپان) از  $200^{\circ}\text{C}$  تا  $300^{\circ}\text{C}$  را نشان می‌دهد [۹]. افزایش دمای محصولات احتراق و آلاینده NO تا دمای  $240^{\circ}\text{C}$  به دلیل افزایش انرژی ورودی، احتراق بهتر سوخت و عدم تغییر چشمگیر در نرخ تابش شعله است.



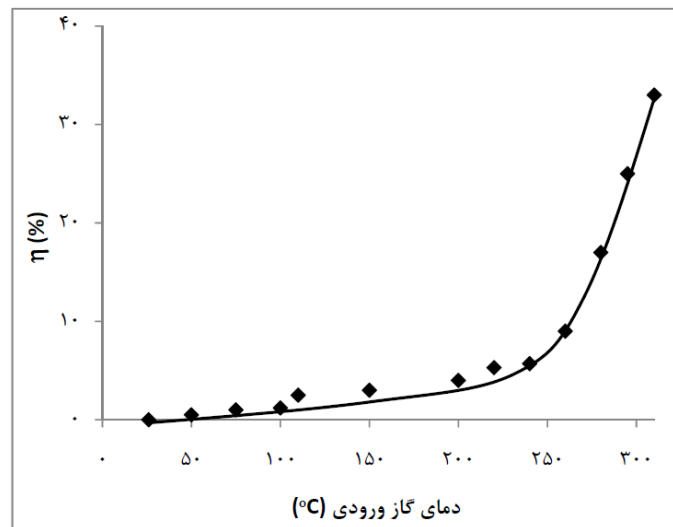
شکل ۳- مقایسه تغییرات دما و آلاینده NO در خروجی دودکش بر حسب دمای گاز ورودی

در شکل (۴)، اثر افزایش دمای گاز ورودی بر درصد افزایش بازده دیگ نشان داده شده است. بازده دیگ به صورت مجموع حرارت منتقل شده به آب نسبت به کل حرارت آزاد شده از گاز و انرژی مورد نیاز برای گرم کردن گاز در نظر گرفته شده است. درصد تغییر بازده دیگ به صورت زیر تعریف شده است:

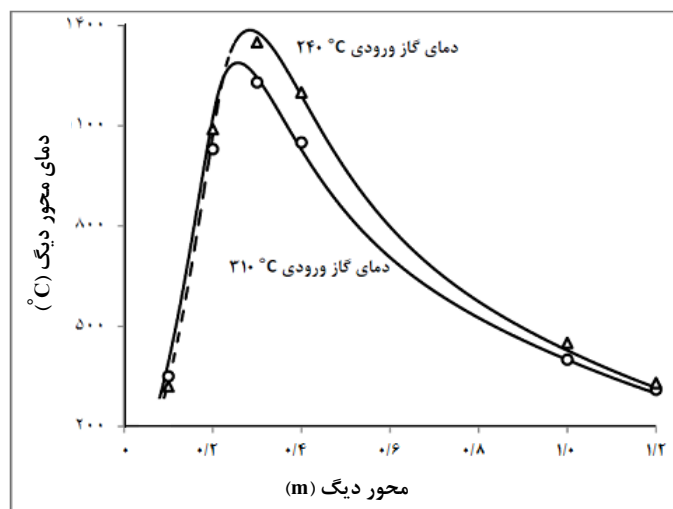
$$\eta = \frac{\dot{\eta}_T - \dot{\eta}_0}{\dot{\eta}_0} \quad (7)$$

که در آن  $\dot{\eta}_T$  و  $\dot{\eta}_0$  به ترتیب مقادیر بازده محاسبه شده در دمای اولیه گاز ورودی و در دمای گاز ورودی T می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دمای گاز تا  $240^{\circ}\text{C}$  بازده نیز به نرمی افزایش می‌یابد که دلیل آن احتراق بهتر گاز و تغییر کمی در رنگ شعله است. نتایج اندازه‌گیری شده از آنالیز محصولات احتراق داخل دودکش نشان می‌دهد با افزایش دمای گاز ورودی میزان هیدروکربن‌های نسوخته از ۱۰۰ ppm به صفر می‌رسد. از طرفی، با افزایش دمای گاز از  $240^{\circ}\text{C}$  به  $310^{\circ}\text{C}$ ، بازده دیگ به طور ناگهانی ۲۰ درصد افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش سهم تابش درخشانی شعله است. براساس تصاویر گرفته شده از شعله و اندازه‌گیری تابش (شکل ۲)، تغییرات دما و آلاینده NO در دودکش (شکل ۳) و بازده دیگ (شکل ۴)، مشاهده می‌شود با افزایش دمای گاز بیش از  $240^{\circ}\text{C}$  دمای شعله، به دلیل افزایش تابش درخشندگی، کاهش و بازده به شدت افزایش می‌یابد.

در شکل (۵)، توزیع دمای محوری دیگ به ازای دو دمای  $240^{\circ}\text{C}$  و  $310^{\circ}\text{C}$ ، که بیان‌کننده دو حالت مختلف شعله از نظر درخشانی نیز می‌باشد، بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دمای گاز دمای بیشینه شعله حدود  $150^{\circ}\text{C}$  کاهش یافته است. این کاهش ناگهانی در دمای بیشینه شعله به دلیل افزایش نرخ تجزیه حرارتی گاز و همچنین افزایش تابش شعله که یکی از سازوکارهای مهم سرد شدن شعله است [۱]، می‌باشد. حضور و احتراق ذرات کربن در شعله سبب افزایش تابش درخشانی و در نتیجه تابش شعله می‌شود. این رفتار شعله در نتایج به دست آمده از احتراق با هوای داغ (HiTAC) نیز مشاهده می‌شود [۱۹].

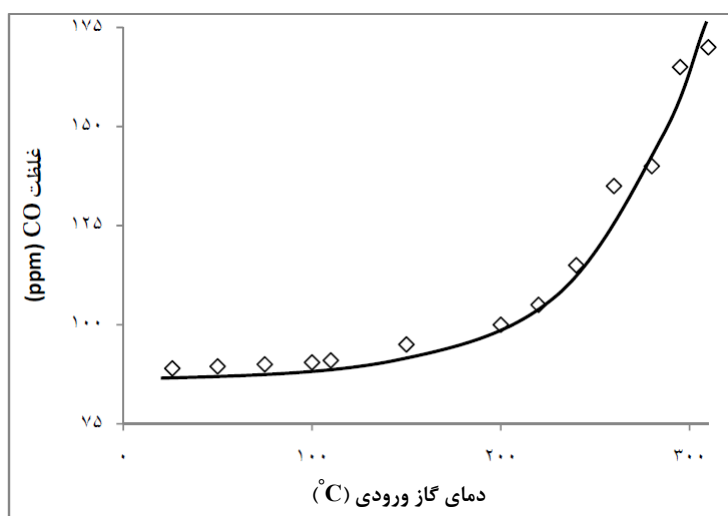


شکل ۴- اثر دمای گاز ورودی بر بازده دیگ



شکل ۵- مقایسه نتایج اندازه‌گیری دما روی محور دیگ برای دو دمای گاز ورودی ۲۴۰°C و ۳۱۰°C

در شکل (۶)، اثر افزایش دمای گاز ورودی بر افزایش غلظت گاز CO در خروجی دودکش بررسی شده است. مشاهده می‌شود با افزایش دمای گاز مقدار CO از حدود ۹۰ ppm به حدود ۱۸۰ ppm می‌رسد. نتایج موجود از پیش‌گرمایش هوای ورودی از ۳۰۰ K تا ۵۶۰ K نشان می‌دهد عامل اصلی افزایش CO افزایش سرعت تجزیه گاز CO<sub>2</sub> به CO است [۶]. نتایج همدی و همکارانش بر روی احتراق مخلوط پیش‌آمیخته متان- هوا در دو حالت پرسوخت و رقیق‌شده در سیستم HiTAC نیز نشان‌دهنده افزایش CO با افزایش دمای هوای ورودی است [۱۹]. مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد در دو دمای هوای ورودی ۳۰۰ K و ۱۵۰۰ K میزان بیشینه CO داخل شعله تقریباً یکسان است، اما در هوای ورودی پیش‌گرم‌شده تبدیل CO به CO<sub>2</sub> به شدت کاهش و انتشار CO افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش نرخ واکنش برگشت آن و تجزیه CO<sub>2</sub> بیان شده است. با توجه به افزایش چشمگیر آلاینده CO با افزایش دمای سوخت ورودی، دماهای پیش‌گرم بالاتر از ۳۱۰°C، به دلیل نزدیک شدن به حد بالای مجاز انتشار این آلاینده، چندان مناسب نیست.



شکل ۶- اثر دمای گاز ورودی بر غلظت گونه CO داخل دودکش

همچنین، نتایج اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد، با افزایش دمای سوخت ورودی بیش از  $100^{\circ}\text{C}$ ، میزان هیدروکربن‌های نسوخته در دودکش صفر شده که نشان‌دهنده بهبود فرایند احتراق است.

### نتیجه‌گیری کلی

در این مقاله، اثر پیش‌گرم کردن گاز طبیعی بر درخشندگی و دمای شعله، انتقال حرارت تابشی و در نتیجه بازده یک دیگ  $120$  کیلوواتی مطالعه شده است. نتایج محققان مختلف نشان می‌دهد عامل اصلی درخشندگی شعله حضور و احتراق ذرات جامد دوده داخل شعله است. با توجه به اینکه تجزیه حرارتی سوخت یکی از سازوکارهای مهم تولید دوده در شعله است و با افزایش دما نرخ تجزیه به‌شدت افزایش می‌یابد، لذا افزایش دمای گاز می‌تواند روشی مناسب برای تولید شعله‌های درخشان در احتراق گاز طبیعی باشد. بر اساس نتایج ارائه‌شده در این مقاله می‌توان گفت:

- برای ایجاد درخشندگی در شعله گاز طبیعی به روش پیش‌گرم کردن سوخت، لازم است گاز ورودی بیش از  $240^{\circ}\text{C}$  پیش‌گرم شود.
- پیش‌گرم کردن سوخت ورودی تا دمای بیش از  $240^{\circ}\text{C}$ ، به دلیل افزایش سهم تابش درخشانی، سبب افزایش  $20$  درصدی بازده دیگ شد.
- افزایش تابش درخشانی در اثر پیش‌گرم کردن سوخت ورودی دمای بیشینه شعله را  $150^{\circ}\text{C}$  کاهش داد.
- پیش‌گرم کردن سوخت تا دمای بیش از  $240^{\circ}\text{C}$ ، به دلیل کاهش دمای شعله، مقدار آلاینده NO را نیز به مقدار چشمگیری کاهش می‌دهد.
- از نظر افزایش درخشندگی شعله و بهبود انتقال حرارت تابشی، روش پیش‌گرم کردن سوخت به دلیل نیاز به انرژی گرمایی بسیار کمتر نسبت به روش پیش‌گرم کردن هوا ارجحیت دارد.

### منابع

1. R. Viskanta and M. P. Mengü, "Radiation Heat Transfer in Combustion Systems," *Progress in Energy and Combustion Science*, 13, pp. 97-160, 1987.
2. E. P. Keramidaa, H. H. Liakosa, M. A. Fountib, A. G. Boudouvisa and N. C. Markatos, "Radiative Heat Transfer in Natural Gas-Fired Furnaces," *Heat and Mass Transfer*, 43, pp. 1801-1809, 2000.



3. A. E. S. Green, B. A. S. Green and J. C. Wagner, "Radiation Enhancement in Oil/Coal Boilers Converted to Natural Gas," *United States Patent* 5048433, 1990.
4. L. Xie, T. Kishi and M. Kono, "The Influences of Electric Fields on Soot Formation and Flame Structure of Diffusion Flames," *Thermal Science*, 2, pp. 288-293, 1993.
5. B. K. Mandal, A. Sarkar and A. Datta, "Numerical Prediction of the Soot and NO Formation in a Confined Laminar Diffusion Flame without and with Air Preheat," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: J. Power and Energy*, 220, pp. 473-486, 2006.
6. J. Lim, J. Gore and R. Viskanta, "A Study of the Effects Air Preheat on the Structure of Methane/Air Counterflow Diffusion Flames," *Combustion and flame*, 121, pp. 262-274, 2000.
7. W. B. Kim, D. H. Chung, J. B. Yang, D. S. Noh, "An Experimental Study on High Temperature and Low Oxygen Air Combustion," *Thermal Science*, 9, pp. 169-175, 2001.
8. B. Kinsur and C. M. Megaridis, "Fuel Preheat Effects on Soot-Field Structure in Laminar Gas Jet Diffusion Flames Burning in 0-g and 1-g," *Combustion and Flame*, 116, pp. 334-347, 1999.
9. W. Yang and W. Blasiak, "Numerical Study of Fuel Temperature Influence on Single Gas Jet Combustion in Highly Preheated and Oxygen Deficient Air," *Energy*, 30, 385-398, 2005.
10. S. Abanades and G. Flamant, "Experimental Study and Modeling of a High-Temperature Solar Chemical Reactor for Hydrogen Production from Methane Cracking," *Hydrogen energy*, 32, pp. 1508-1515, 2007.
11. A. Atreya, C. Zhang, H. K. Kim, T. Shamim and J. Suh, "The Effect of Changes in the Flame Structure on Formation and Destruction of Soot and NO<sub>x</sub> in Radiating Diffusion Flames," *The Twenty-Sixth (International) Symposium on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 2181-2189, 1996.
12. H. P. Mungekar and A. Atreya, "Flame Radiation and NO Emission in Partially Premixed Flames," In *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Joint Meeting of the US Sections of the Combustion Institute*, 2001.
13. P. B. Taylor and P. J. Foster, "Some Gray Weighting Coefficients for CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-Soot Mixtures," *Heat Transfer*, 18, pp. 1331-1332, 1974.
14. EN 676, "Automatic Forced Draught Burners for Gaseous Fuels," European Standards, 2003.
15. Short Operation Instruction Manual (testo 350 M/XL): Rev.11/03 Instrument Software Version 1.30, Testo Inc., <http://www.testo.com>, 2006.
16. F. Nagamine, R. Shimokawa, Y. Miyake, M. Nakata and K. Fujisawa, "Calibration of Pyranometers for the Photovoltaic Device Field," *Applied Physics*, 29, pp. 516-521, 1990.
17. Y. H. Lia, C. Y. Wub, H. Y. Lia and Y. C. Chao, "Concept and Combustion Characteristics of the High-Luminescence Flame for Thermophotovoltaic Systems," *Proceedings of the Combustion Institute*, 33, pp. 3447-3454, 2011.
18. Y. S. Zhukov, V. K. Karpushin, B. N. Kurochkin, N. A. Fomin, A. P. Klyucheroov and V. F. Girisikh, "Preheating the Natural Gas Used to Heat Open-Hearth Furnaces," *Translated from Metallur*, 5, pp. 23-24, 1977.
19. M. Hamdi, H. Ben Ticha and M. Sassi, "NO<sub>x</sub> Emission from High Temperature Air Versus Methane/Air Counter-Flow Partially Premixed Flame," *IFRF Combustion Journal*, Article Number 200403, 2004.

## English Abstract

# Experimental Study of Natural Gas Temperature Effects on the Flame Luminosity and NO Emission in a 120 kW Boiler

S. M. Javadi and M. Moghiman

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad  
(Received: 2010/12/21, Received in revised form: 2011/5/28, Accepted: 2011/6/21)

*In gas-fired furnaces, the flame radiation enhancement significantly improves the radiative heat transfer, which in turn reduces flame temperature and NO emission. In this paper, the effect of inlet natural gas preheating on the flame luminosity and overall efficiency in a 120KW boiler are investigated experimentally. Flame radiation is measured by use of laboratory pyranometer with photovoltaic sensor. A Testo350XL gas analyzer is also used for measuring the temperature and combustion species. The experimental measurements show that the effect of increasing inlet gas temperature on flame luminosity is increased abruptly for temperatures over 240 °C. This luminosity increase has considerable effects on flame temperature and NO emission reduction and enhances the boiler efficiency. The results also show that increasing the inlet gas temperature from 240 °C up to 300 °C increases the flame luminous radiation by 60%. The obtained results are in desirable accordance with finding of other studies regarding fuel preheating.*

**Keywords:** Fuel preheating, Flame luminosity, Maximum temperature, NO emission