نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره پیاپی ۱۱۵، جلد ۵۶، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، صفحه ۹۳-۱۰۳ – پژوهشی کامل - DOI: 10.22034/jmeut.2026.65791.3516

مطالعه‌ی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی تأثیر افزودن محصولات احتراق ناقص و متان بر شعله‌ی متان

جواد خادم* دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، jkhadem@birjand.ac.ir

علی سعیدی استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، ali.saeedi@birjand.ac.ir

علی اسدی استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بزرگمهر قائنات، قائن، ایران، a_asadi@buqaen.ac.ir

یاسر شمسی ثانی کاخکی کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، yasershamsi_007@yahoo.com

چکیده

یکی از راه‌های افزایش راندمان و کاهش آلاینده‌ها در احتراق، تزریق افزودنی‌ها از جمله محصولات احتراق یا گونه‌های خاص به شعله است. در این مقاله اثر افزودن محصولات احتراق ناقص و متان به شعله بر روی دما، تابش و انتشار آلاینده‌ها به روش تجربی و شبیه‌سازی عددی بررسی شده است. استخراج نتایج تجربی با طراحی و ساخت یک کوره‌ی فرعی برای تولید محصولات احتراق ناقص و یک کوره‌ی اصلی برای انجام احتراق صورت پذیرفت. شبیه‌سازی عددی نیز با استفاده از نرم‌افزار Ansys Fluent انجام شد. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی تطابق نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که میانگین حداکثر دما در حالت تزریق همزمان محصولات احتراق ناقص و متان از حالت تزریق به تنهایی هرکدام بیشتر است. تزریق افزودنی به شعله باعث گردید که رنگ شعله از آبی به زرد تغییر کند که موجب افزایش انتقال گرمای تابشی می‌شود. همچنین تزریق افزودنی تا ۵ درصد، باعث افزایش انتشار NOx و پس از آن با افزایش تزریق تا ۱۵ درصد، باعث کاهش انتشار NOx گردید. بیشترین میزان دوده در حالت افزودن محصولات احتراق ناقص و متان به شعله رخ می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: محصولات احتراق، متان، NOx، دوده، تابش، شبیه‌سازی عددی.

Experimental Study and Numerical Simulation of the Impact of Adding Incomplete Combustion Products and Methane on Methane Flame

J. Khadem Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

A. Saeedi Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

A. Asadi Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bozorgmehr University of Qaenat, Qaen, Iran

Y. Shamsi Sani Kakhki Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

Abstract

One of the strategies for improving efficiency and reducing emissions in combustion is the injection of additives, including combustion products or specific species, into the flame. In this paper, the effects of adding incomplete combustion products and methane to the flame on temperature, radiation, and the emission of key pollutants were investigated experimentally and through numerical simulations. The experimental results were obtained using a setup consisting of a carbon black furnace for producing incomplete combustion products and a main furnace for combustion. Numerical simulations were conducted using ANSYS Fluent software. The comparison between numerical and experimental results showed relatively good agreement. The simulation results indicated that, in general, the maximum average temperature in the simultaneous and uniform injection of incomplete combustion products and methane is higher than the case of injecting methane and incomplete combustion products injection alone. Injecting additives into the flame caused the flame color to shift from blue to yellow, increasing radiative heat transfer. Also, injecting the additive into the flame initially increased NOx emissions by 5% and then increased to 15%, reducing NOx emissions. The highest amount of soot occurs when incomplete combustion products and methane are added to the flame.

Keywords: Combustion products, Methane, NOx, Soot, Radiation, Numerical simulation.

۱- مقدمه

با پیشرفت علم و فناوری و وجود گستره‌ی عظیم منابع گازی در کشور، یکی از بهترین سوخت‌های فسیلی، گاز طبیعی است. از طرفی به دلیل پایین بودن میزان کربن موجود در سوخت و کمترین میزان آلاینده‌ها در بین سوخت‌های فسیلی، استفاده از آن رو به افزایش است.

مشعل‌های با سوخت گاز طبیعی کاربرد فراوانی در صنایع مختلف نظیر دیگ بخار انواع نیروگاه‌ها، صنایع فولادی، سرامیک و غیره دارند. این در حالی است که جایگزینی مشعل‌های سوخت مایع با مشعل‌های گاز طبیعی، برای حوزه‌ی صنعت و تولیدکنندگان صنعتی مشکلات عدیده‌ای ایجاد کرده است. از جمله این مشکلات بالا بودن دما در این

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: jkhadem@birjand.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۳/۱۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۰۵/۰۱/۱۷

مشعل‌ها و تولید آلاینده‌هایی نظیر اکسیدهای نیتروژن و دوده و همچنین پایین بودن راندمان حرارتی می‌باشد.

یکی از روش‌های مهم انتقال گرما از شعله که در راندمان حرارتی تاثیر چشمگیری دارد، انتقال گرما از طریق تابش می‌باشد و تا به امروز تحقیقات بسیاری به صورت آزمایشگاهی و عددی بر روی انتقال گرمای تابشی شعله‌ها صورت گرفته است.

محصولات عمده و اصلی احتراق گاز طبیعی، دی اکسید کربن و بخار آب می‌باشد که باندهای تابشی بسیار ضعیفی دارند. عدم وجود ذرات دوده که ضریب صدور بالا و نزدیک به جسم سیاه دارند، در ساختار شعله، موجب غیر درخشان بودن و پایین بودن انتقال گرمای تابشی در شعله شده است. از طرفی موضوع بحران‌های زیست محیطی و بهینه‌سازی مصرف انرژی باعث شده است که تحقیقات زیادی پیرامون استفاده‌ی صحیح از انرژی به ویژه سوخت‌های فسیلی و در عین حال استفاده از سوخت‌های با آلایندگی کمتر، گسترش پیدا نماید. بنابراین محققان به دنبال روش‌هایی هستند که از طریق افزایش غلظت ذرات کربن‌دار در درون شعله‌های غیر درخشان باعث بهبود درخشندگی و انتقال گرمای تابشی آن‌ها گردند. از سوی دیگر افزودن این مواد کربن‌دار در میزان تولید آلاینده‌ها تأثیر چشمگیری دارد. همچنین محققان معتقدند که تزریق ذرات کربن باعث افزایش تابش و آلاینده‌ها شده و برای کنترل آلاینده‌ها از بازگردانی محصولات احتراق[1] یا تزریق محصولات احتراق استفاده می‌شود.

اثر نرخ بازگردانی گازهای خروجی در یک مشعل گازسوز با سوخت متان توسط شی و همکاران [۱] مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها اظهار داشتند که با افزایش میزان نرخ بازگردانی، طول شعله افزایش و تابش و دمای شعله کاهش می‌یابد. با انجام فرایند بازگردانی، نسبت هم‌ارزی کاهش یافته و دمای شعله و غلظت اتمی اکسیژن، کاهش می‌یابد که در نهایت موجب کاهش تشکیل NO می‌شود.

جوادی و مقیمان [۲] به مطالعه‌ی آزمایشگاهی اثر افزایش دمای سوخت ورودی بر درخشندگی و انتشار آلاینده‌ی NO در یک دیگ بخار گازسوز پرداختند. آن‌ها بر این باورند که انتقال گرمای تابشی متأثر از درخشندگی شعله می‌باشد و از شیوه‌های افزایش درخشندگی شعله، افزایش محتوای دوده در آن است. نتایج آن‌ها نشان داد که در دماهای بالای ۲۴۰ درجه سلسیوس، مولکول‌های کربن موجود در گاز آزاد شده و درخشندگی شعله افزایش می‌یابد.

اثر رقیق‌سازی شعله با دی اکسید کربن توسط ابراهیمی و همکاران [۳] مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها برای شبیه‌سازی کوره از مدل‌های آشفتگی k-ε استفاده کردند. در این تحقیق N_2 حذف و به جای آن CO_2 به عنوان اکسید کننده همراه اکسیژن وارد محفظه‌ی احتراق گردید. نتایج نشان داد که نور مرئی و بیشینه‌ی دما کاهش یافت. آن‌ها همچنین اظهار داشتند که احتراق با اکسیژن غنی موجب می‌شود یکنواختی توزیع دما ۱۰ الی ۱۵ درصد افزایش و انتشار آلاینده ی NOx کاهش یابد.

دووا و همکاران [۴] به مطالعه‌ی مشخصات احتراق متان در مجاورت رقیق‌سازی به کمک گازهای خروجی اصلی CO_2، H_2O و N_2 پرداختند. آن‌ها به کمک ترکیبی از این سه گونه اقدام به رقیق‌سازی کردند که موجب آرام سوزی سوخت گردید. نتایج آن‌ها نشان داد که دما، فشار، نسبت‌های هم‌ارزی و نسبت‌های رقیق‌سازی در محصولات احتراق بسیار مؤثر است.

سی و همکاران [۵] به مطالعه‌ی تجربی و عددی کوره با سوخت متان و اثر رقیق‌سازی سه گونه‌ی اصلی گاز خروجی یعنی CO_2، H_2O و N_2 پرداختند. آن‌ها احتراق متان را غیر پیش‌آمیخته در نظر گرفته و اثرات این گونه‌های رقیق‌کننده را بر پایداری شعله، انتشار آلاینده‌ها و انتقال گرمای تابشی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که رقیق‌سازی با بخار آب و دی اکسید کربن حتی برای غلظت‌های بالای ۳۰ درصد اکسیژن نیز مناسب‌تر از رقیق‌کننده‌ی N_2 است. آن‌ها اظهار داشتند که بهترین رقیق‌کننده CO_2 است. چرا که توزیع دمای داخل کوره کاملاً یکنواخت شده و پایین‌ترین دمای بیشینه و یکنواخت‌ترین حالت انتقال گرمای تابشی بر روی دیواره کوره قابل مشاهده است. همچنین رقیق‌کننده‌ی H_2O منجر به کمترین انتشار CO و NO و بیشترین نسبت تابش به دیواره‌ی کوره گردید. این رقیق‌کننده‌ها برای اکسیژن با غلظت پایین مناسب‌اند چرا که زمانی که اکسیژن غنی است، رقیق‌کننده‌ها موجب افزایش NOx شدند.

تأثیر بازگردانی گازهای خروجی احتراق بر انتشار NOx در احتراق CH_4/H_2-هوا در فشار ۲۵ بار و نسبت هم‌ارزی ۰٫۷ در شعله‌های لایه‌ایی و آشفته‌ی جزئی پیش‌آمیخته توسط سسری و همکاران [۶] بررسی شد. شبیه‌سازی‌های عددی برای ۲۰ شعله‌ی پیش‌آمیخته و جزئی پیش‌آمیخته با مقادیر هیدروژن از ۰ تا ۱۰۰ درصد، با و بدون EGR انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که در فشار بالا، غنی‌سازی گاز طبیعی با هیدروژن در حالت EGR منجر به کاهش انتشار NOx و همچنین CO_2 می‌گردد.

برای شبیه‌سازی اثر بازگردانی گازهای خروجی بر محدودیت‌های خاموشی شعله‌های جایگزین شده با آمونیاک، چو و همکاران [۷] دی-اکسیدکربن را به جریان اکسید کننده اضافه کردند. با افزودن دی-اکسید کربن، محدوده‌های خاموشی پایین‌تری مشاهده شد که ناشی از اثرات گرمایی و شیمیایی بود. افزودن دی اکسید کربن دمای شعله‌ها را کاهش داد و مانند جایگزینی آمونیاک، واکنش‌هایی را معرفی کرد که رادیکال‌ها را مصرف می‌کنند. برای شعله‌های آمونیاک، تولید NO توسط اکسیداسیون آمونیاک با OH تقویت می‌شود، در حالی که برای افزودن دی اکسید کربن، تولید NO با کاهش OH مهار می‌شود.

ابوالنور و همکاران [۸] تأثیر افزودن هیدروژن و بازگردانی گازهای خروجی بر ویژگی‌های احتراق و آلایندگی‌ها در یک موتور دوگانه‌سوز دیزل-هیدروژن را بررسی کردند. در این مطالعه یک مدل سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی از یک موتور دیزل سنگین تحت شرایط بار کامل و سرعت ثابت ۱۶۰۰ دور بر دقیقه استفاده شد. هیدروژن با درصدهای مختلف ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد از کل انرژی حرارتی به سیستم ورودی تزریق شد، در حالی که گازهای خروجی به میزان ۵ و ۱۰ درصد از حجم ورودی گاز با ۴۰ درصد هیدروژن مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش درصد هیدروژن بازده موتور را بهبود می‌بخشد. انتشار CO و دوده به ترتیب تا ۳۳ و ۸۸ درصد با افزودن ۵۰ و ۴۰ درصد هیدروژن کاهش یافت، در حالی که انتشار NOxبه طور قابل توجهی تا ۵۷ درصد با افزودن ۵۰ درصد هیدروژن

[1] Exhaust Gas Recirculation (EGR)

افزایش یافت. علاوه بر این، استفاده از گازهای خروجی با حجم ۱۰ درصد ورودی، به طور مؤثری انتشار NOx را کاهش و تولید CO را افزایش داد.

تأثیر موتورهای گاز طبیعی با اشتعال پیلوت دیزل بر ویژگی‌های احتراق و انتشار آلاینده‌ها در حجم‌های مختلف بازگردانی گازهای خروجی توسط شو و همکاران [۹] بررسی شد. آن‌ها از یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی سه بعدی که با یک مدل شیمیایی سینتیکی ساده شده ترکیب شده، استفاده کردند. نتایج تجربی برای هدایت محاسبات شبیه‌سازی در سه شرایط عملیاتی متمایز به کار گرفته شد. تحلیل نتایج محاسبات، فرایند احتراق و ویژگی‌های انتشار آلاینده‌ها در موتور را نمایش داده و مکانیزم تأثیر بازگردانی محصولات احتراق بر این ویژگی‌ها را روشن ساخت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش نرخ EGR، فشار بیشینه‌ی داخل سیلندر به میزان ۱۵ بار کاهش و نرخ آزادسازی گرما با تأخیر افزایش یافت.

فرخی و همکاران [۱۰] یک محفظه‌ی احتراق ۲۰ کیلو وات گرمایی تحت شرایط ورودی مختلف را مورد بررسی قرار دادند تا اثر بازگردانی محصولات احتراق در بهبود پایداری شعله و کنترل انتشار آلاینده‌ها هنگام استفاده از مخلوط گاز متان غنی شده با هیدروژن را ارزیابی کنند. برای این منظور، از مدل شبکه‌ی راکتور شیمیایی استفاده کردند. مدل شبکه‌ی راکتور شیمیایی ابزاری سریع و کم هزینه از نظر محاسباتی برای مدل‌سازی عملکرد احتراق و انتشار آلاینده‌ها است که میدان‌های جریان واکنشی پیچیده را از طریق مدل‌های راکتوری ایده‌آل ساده‌سازی می‌کند و هزینه‌های محاسباتی را کاهش می‌دهد. در این مطالعه شرایط بار جزئی، ترکیب سوخت‌ها و اثر رقیق‌سازی هوای احتراق از طریق EGR بررسی گردید. نتایج مدل شبکه‌ی راکتور شیمیایی نشان می‌دهد که افزودن هیدروژن باعث افزایش زیاد NOx نمی‌شود، زیرا میکرو توربین در حالت توان ثابت کار می‌کند. در واقع، واکنش‌پذیری بالاتر هیدروژن منجر به کاهش نرخ جریان سوخت و در نتیجه شرایط عملیاتی رقیق‌تر می‌شود. از سوی دیگر، انتشار CO با افزودن ۵ تا ۵۰ درصد هیدروژن به متان، بین ۱۵ تا ۴۰ درصد کاهش یافت. در نهایت، رقیق‌سازی هوا از طریق EGR تأثیر مثبتی بر دمای شعله و انتشار NOx داشت.

بررسی تأثیر بازگردانی گازهای خروجی بر پیش اشتعال مخلوط‌های گاز سوختی که شامل مخلوط گاز-EGR متان و مخلوط گاز-EGR هیدروژن می‌باشد، توسط ونگ و همکاران [۱۱] انجام شد. علاوه بر آن، این مطالعه اثرات اجزای موجود در گاز EGR، به ویژه CO_2 و H_2O برای موتورهای گاز طبیعی و H_2O برای موتورهای هیدروژنی را بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که EGR نقش حیاتی در افزایش زمان تأخیر اشتعال قطرات روغن ایفا می‌کند و به این ترتیب زمان شروع پیش اشتعال را به تعویق می‌اندازد. همچنین EGR باعث کاهش سرعت انتشار شعله شده و منجر به کاهش حداکثر فشار احتراق می‌شود.

لذا با مطالعه‌ی پژوهش‌های پیشین مشاهده می‌شود که یکی از مشخصه‌های بارز در شعله‌های سوخت‌های مایع و جامد، میزان تابش بالای آن‌هاست که به دلیل وجود ذرات جامد کربن در سوخت و تولید دوده در شعله می‌باشد. این در حالی است که در سوخت‌های سبک مانند گاز طبیعی به علت پایین بودن میزان کربن، دوده‌ی بسیار کمی در شعله تشکیل می‌گردد و لذا شعله‌ی گاز طبیعی درخشندگی کمتری داشته و آبی رنگ است. بنابراین سهم انتقال گرمای تابشی آن به نسبت دیگر سوخت‌ها بسیار کمتر بوده و نقش انتقال گرمای تابشی در دماهای بالا در شعله‌ی گاز طبیعی ضعیف است. از طرفی در پژوهش‌های گذشته اثر بازگردانی محصولات احتراق کامل بر شعله بررسی شده و تاکنون اثر افزودن محصولات احتراق ناقص بر ویژگی‌های شعله مورد مطالعه قرار نگرفته است. از این رو در این پژوهش اثر تزریق محصولات احتراق ناقص و افزایش غلظت کربن در شعله بر پارامترهای تابشی، دما و انتشار آلاینده‌هایی نظیر NOx و دوده در کوره‌های گاز طبیعی به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی می‌باشد. جریان پایا فرض شده و از جملات زمانی صرف نظر گردیده است. معادله‌ی پیوستگی به صورت زیر است.

$$\nabla.(\rho V) = 0 \quad (۱)$$

که در آن V بردار سرعت و ρ چگالی سیال را نشان می‌دهد. فرم کلی معادله‌ی اندازه حرکت به صورت زیر است.

$$V.\nabla(\rho V) = -\nabla P + \nabla.\left((\mu + \mu_t)\nabla V\right) \quad (۲)$$

که در آن μ و μ_t به ترتیب لزجت جریان لایه‌ایی و مغشوش و P فشار است. برای به دست آوردن لزجت جریان مغشوش نیاز است که از مدل‌های مغشوش مانند مدل k-ε استفاده شود که در این مدل، لزجت مغشوش استاندارد به وسیله‌ی رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$\mu_t = \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۳)$$

در این رابطه C_u یک عدد ثابت است، k انرژی جنبشی مغشوش و ε نرخ اتلاف مغشوش است. معادلات حاکم برای محاسبه‌ی k و ε به صورت زیر است.

$$V.\nabla(\rho k) = \nabla.\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k\right) + G_k + G_b - \rho\varepsilon \quad (۴)$$

$$V.\nabla(\rho \varepsilon) = \nabla.\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla \varepsilon\right) + C_{1e}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3e}G_b) - C_{2e}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۵)$$

در معادلات (۴) و (۵)، G_b تولید انرژی جنبشی به دلیل نیروی شناوری، G_k تولید انرژی جنبشی به دلیل گرادیان سرعت متوسط، σ_k و σ_ε عدد پرانتل برای k و ε و مقادیر C عدد ثابت است و به صورت تجربی به دست می‌آید.

شکل کلی معادله‌ی انرژی به صورت زیر است.

$$\rho\frac{De}{Dt} = -\rho(\nabla.V) - \nabla.q_c - \nabla.q_r + \Phi + \dot{q} \quad (۶)$$

در این معادله e انرژی داخلی بر واحد جرم، q_c انتقال گرمای رسانشی، q_r انتقال گرمای تابشی، Φ تابع اتلافات و $\dot{q}$ نرخ تولید انرژی بر واحد حجم می‌باشد. برای یک جریان پایا و با سرعت کم که تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل و اتلاف ناشی از گرانروی در آن ناچیز باشد، معادله انرژی به صورت زیر ساده می‌شود.

$$\nabla.(\rho V T) = \nabla.\left(\frac{k}{C}\right)\nabla T - \nabla.q_r + \frac{S_h}{C} \quad (۷)$$

که در آن T نشان‌دهنده‌ی دما و S_h آهنگ حجمی تولید گرما می‌باشد. C نیز گرمای ویژه در فشار ثابت است. طبق قانون رسانش فوریه، جمله‌ی $\nabla.k\nabla T$ نشان‌دهنده‌ی تأثیر انتقال گرما به طریق رسانش در داخل سیال است.

معادله بقاء گونه‌ها به فرم زیر می‌باشد:

$$\nabla.(\rho Y_k V) = -\nabla.I_k + \dot{\omega}_k \quad (۸)$$

که در آن Y_k کسر جرمی گونه‌ی k ام، I_k شار نفوذی گونه‌ی k ام و $\dot{\omega}_k$ نرخ تولید گونه‌ی k ام می‌باشد.

مدل تابشی انتخابی در این پژوهش کاربرد بیشتری نسبت به دیگر مدل‌ها دارد به طوری که این روش اثر گونه‌ها را نیز بررسی می‌کند و معادله‌ی انتقال تابش، حل ساده‌تر و سریع‌تری دارد. در این مدل اثرات پخش در نظر گرفته شده و برای مسائل پیچیده نیز استفاده می‌شود. مدل P-1 شارهای گرمایی تابشی را از چاه یا چشمه‌های گرمایی پیش‌بینی می‌کند.

$$q_r = -\frac{1}{3(a+\sigma_s)-C\sigma_s}\sigma G \quad (۹)$$

که در این معادله a ضریب جذب گاز، σ_s ضریب پخش، G شدت تابش و C ضریب تبادل می‌باشد. رابطه‌ی تشکیل دوده نیز به صورت زیر است.

$$\nabla.(\rho Y_{soot} V) = \nabla.\left(\left(\frac{\mu_t}{\sigma_{soot}}\right)\nabla Y_{soot}\right) + R_{soot} \quad (۱۰)$$

که در آن Y_{soot} کسر جرمی دوده، σ عدد پرانتل و R_{soot} نیز نرخ خالص تولید دوده می‌باشد.

ارتباط مدل‌های انتخابی در شبیه‌سازی فلوئنت با معادلات حاکم (بقای جرم، اندازه حرکت، انرژی و گونه‌ها) مستقیم و بر اساس مفهوم ترم‌های منبع (Source Terms) است. به عبارت دیگر معادلات حاکم، بقای فیزیکی را تعریف می‌کنند و مدل‌ها تعیین می‌کنند که چه چیزی به این بقا اضافه یا کم می‌شود.

۳- شبیه‌سازی عددی

شکل ۱-الف طرحواره کوره‌ی فرعی یا همان کوره‌ی سیاه کربن[1] و شکل ۱-ب نیز کوره‌ی اصلی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. CBF ابزاری برای تأمین محصولات احتراقی است. این کوره که توسط یک شرکت ژاپنی اختراع شده با هدف تولید بیشترین دوده توسط فرایند احتراق متان-هوا مورد استفاده قرار گرفت. این محفظه‌ی احتراق که ابعاد نسبتاً کوچکی دارد شامل یک ورودی سوخت و هوا می‌باشد که میزان سوخت و هوای ورودی با نسبت هم ارزی ۱٫۱ وارد شده و فرایند احتراق تشکیل می‌شود. ضمناً برای تعیین ابعاد این دستگاه بارها عمل شبیه‌سازی و محاسبات دینامیک سیالات صورت گرفته تا بتوان بیشترین دوده را در خروجی آن داشت. لازم به ذکر است علاوه بر حل‌های متعدد جهت پیدا کردن بهترین ابعاد این دستگاه، همچنین نسبت‌های هم‌ارزی مختلف و اثر تزریقات گونه‌های مختلفی همچون بخار آب، متان و هوا نیز مورد بررسی قرارگرفته است.

مراحل اصلی حل عددی، که از نظر ساختاری مشابه یک فلوچارت حل عددی است، به شرح زیر می‌باشد:

- شروع آغاز فرآیند شبیه‌سازی عددی
- تعریف مدل ریاضی و معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی، گونه‌ها، دوده و تابش
- انتخاب مدل‌های فیزیکی مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ ، مدل تابشی P1، مدل دوده دو مرحله‌ای، مکانیزم تولید NOx
- گسسته‌سازی دامنه و معادلات استفاده از روش SIMPLE و مش‌گذاری هندسه کوره
- تعیین شرایط اولیه و مرزی تعریف ورودی سوخت، هوا، محصولات احتراق ناقص و دیواره‌ها
- مقداردهی اولیه حدس اولیه برای دما، سرعت، گونه‌ها و دوده
- حل تکراری با نرم‌افزار Ansys Fluent اجرای حل پایا و بررسی پایداری شعله و انتقال گرما
- بررسی معیار همگرایی باقی‌مانده‌ها، پایداری دما و گونه‌ها،
- در صورت عدم همگرایی حل، بازگشت به حل تکراری و ادامه تکرار تا رسیدن به همگرایی و درصورت همگرایی، پس‌پردازش، اعتبارسنجی و مقایسه با داده‌های تجربی.

برای بررسی معیار همگرایی در هر گام تکرار، همگرایی زمانی حاصل می‌شود که باقیمانده‌های (Residuals) معادلات حاکم به مقادیر زیر یا کمتر از آن برسند:

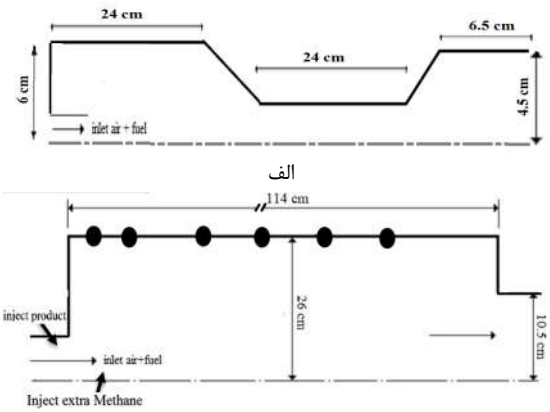
- معادله بقای جرم (پیوستگی): 10^{-3}
- معادلات اندازه حرکت (مومنتوم): 10^{-3}
- معادلات آشفتگی: 10^{-3}
- معادله انرژی (دما): 10^{-6}
- معادله گونه‌ها (Species) و دوده: 10^{-6}.

علاوه بر معیار عددی باقیمانده، برای اطمینان از همگرایی، لازم است که مقادیر مانیتور شده نظیر: نرخ دبی جرمی در مرزهای خروجی، حداکثر دما یا غلظت گونه‌های کلیدی (مانند NOx یا دوده) در ناحیه مورد نظر، در طول تکرارها ثابت شوند و تغییرات ناچیزی داشته باشند.

در کوره‌ی اصلی نیز فرایند احتراق با هوای اضافه صورت گرفته و سوخت به همراه اکسید کننده با نسبت هم‌ارزی ۰٫۹ وارد محفظه‌ی احتراق می‌شود، به طوری که هوا و سوخت متان به همراه درصدی از گازهای خروجی محفظه‌ی احتراق کوچک‌تر، از ورودی با نسبت‌های ۵ الی ۲۰ درصد وارد محفظه می‌شود. دیواره‌ی کوره به صورت شرط عدم لغزش فرض شده است. این دیواره بدون عایق بوده و با محیط بیرون در ارتباط است. جریان تراکم ناپذیر، حل در شرایط پایا و بر اساس فشار می‌باشد. همچنین با توجه به تقارن، نیمی از هندسه‌ی کوره‌ها شبیه‌سازی شده است.

برای مدل‌سازی جریان آشفته از مدل استاندارد k-ε استفاده شده است. شبیه‌سازی انتقال گونه‌ها نیز به روش انتقال گونه‌ها و دو مرحله‌ای است. معادلات به روش SIMPLE، گسسته‌سازی و تحلیل شده است. یکی از ذرات مهم و تاثیر گذار بر نتایج، دوده می‌باشد که با مکانیزم دو مرحله‌ای مدل شده است. برای تولید NO نیز مکانیزم زلدویچ در نظر گرفته شده و تمامی انواع آن از جمله گرمایی، سوختی و سریع لحاظ شده است. با توجه به توانایی تبادل تابش بین ذرات معلق و گاز و همچنین اهمیت دقت و زمان پردازش از مدل P-1 برای مدل‌سازی تابش استفاده شده است. برای انجام شبیه‌سازی فرایند احتراق از نرم‌افزار Ansys Fluent استفاده شد.

[1] Carbon Black Furnace (CBF)



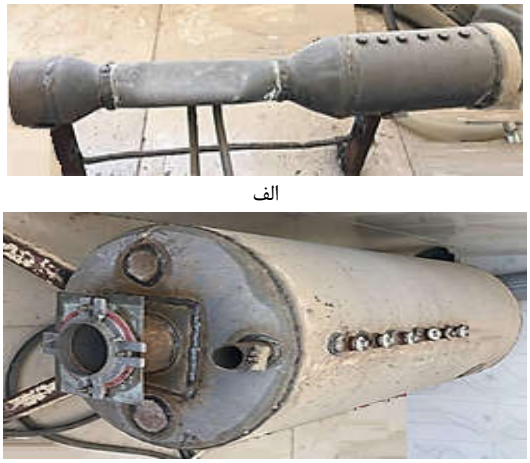
الف

ب

شکل ۱- کوره‌های مدل‌سازی شده در کار حاضر، الف) کوره‌ی فرعی ب) کوره‌ی اصلی.

۴- آزمایش

در پژوهش حاضر یک CBF برای تولید محصولات احتراق ناقص طراحی و ساخته شد (شکل ۲-الف). در خروجی این محفظه‌ی احتراق با استفاده از دریچه‌ی تنظیم دبی، حجم مشخصی از محصولات احتراق ناقص به محفظه‌ی احتراقی اصلی (شکل ۲-ب) هدایت می‌شود. همچنین سوخت متان اضافه در مرکز کوره به درون شعله تزریق می‌گردد. برای ایجاد شعله از یک مشعل دوگانه‌سوز نوع GNG50 ساخت کارخانه‌ی گرم ایران با بیشینه‌ی ظرفیت گرمایی ۵۵۰۰۰kcal/hr با سوخت گاز طبیعی در درون کوره استفاده شد. برای سنجش دمای محور مرکزی کوره از یک ترموکوپل سرامیکی مدل HTC6 با تحمل دمایی ۲۶۰۰ سلسیوس و دقت ±۲/۵ سلسیوس استفاده گردید. این دماسنج از دو بخش فلزی به طول ۱۰ سانتی‌متر و بخش سرامیک نسوز تشکیل شده است. دما در محور مرکزی کوره در ۶ نقطه اندازه‌گیری شده است. در روند انجام آزمایشات، مشاهدات و اندازه‌گیری‌های دمای شعله در چند حالت بدون تزریق گازهای خروجی حاصل از احتراق ناقص و تزریق ۵ تا ۲۰ درصدی آن، انجام شده است. قابل توجه است که درصدهای انتخابی، درصدی از میزان سوخت و هوای ورودی کوره اصلی می‌باشد که از آن کاسته شده و به کربن سیاه منتقل شده تا گونه‌های احتراقی را تولید کند. برای تولید برخی گونه‌های شیمیایی و تزریق به کوره اصلی، با ایجاد یک فرایند احتراق ناقص از یک کوره‌ی فرعی در کنار کوره اصلی استفاده شده است. از مهم‌ترین این گونه‌ها می‌توان به OH، H_2O، CO، NOx، CO_2 و Soot اشاره کرد. نسبت‌های هم‌ارزی مورد استفاده در کوره‌ی فرعی ۰/۹، ۱ و ۱/۱ است. تزریق CH_4 و H_2O در میانه‌ی شعله‌ی این کوره انجام شد تا هدف بیشترین تولید دوده در خروجی حاصل شود. در نسبت هم‌ارزی ۱/۱ میزان قابل قبولی دوده و NOx در خروجی کوره‌ی فرعی وجود داشت، لذا نتایج براساس این نسبت هم‌ارزی انجام شد.



الف

ب

شکل ۲- کوره‌های تجربی ساخته شده، الف) کوره‌ی فرعی و ب) کوره‌ی اصلی

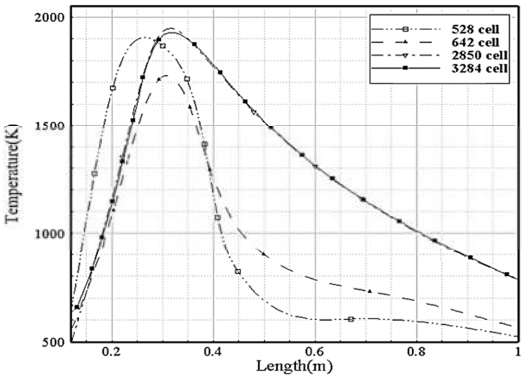
در بخش ورودی کوره‌ی اصلی، یک مشعل و همچنین مجرایی برای تزریق گازهای حاصل از احتراق ناقص قرار داده شده است. مجرایی مجزا نیز در مرکز کوره‌ی اصلی جهت تزریق سوخت متان اضافی برای مقایسه با حالت تزریق محصولات احتراق ناقص قرار دارد. در انتهای کوره یک مجرای خروجی قرار داده شده تا گازهای خروجی از طریق این دودکش به بیرون هدایت شوند. همچنین مقدار تزریق محصولات احتراقی توسط یک دریچه که در مسیر ورودی کوره قرار دارد قابل تنظیم می‌باشد.

آزمایش در حالات گوناگون انجام شد که این حالت‌ها شامل با تزریق و بدون تزریق از گازهای خروجی کوره‌ی فرعی می‌باشد. هدف از انجام این آزمایش کاهش میزان آلاینده‌ها، تغییر رنگ شعله‌ی آبی به زرد، کاهش دمای بیشینه‌ی شعله و بررسی تأثیر افزودن محصولات احتراق ناقص در تابش و سایر گونه‌ها می‌باشد.

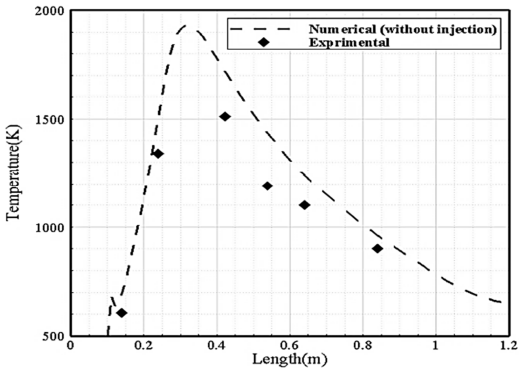
۵- نتایج

استقلال از شبکه: با توجه به مدل‌سازی عددی، تغییرات محوری دما در چهار شبکه‌ی مختلف بررسی گردید و استقلال از شبکه مطابق شکل ۳ بررسی شد. با توجه به عدم تغییر قابل توجه دما برای حالت ریزتر از ۲۸۵۰ مش، این حالت برای اجرا برنامه انتخاب گردید.

اعتبارسنجی: شکل۴ نتایج دمای محور مرکزی کوره‌ی اصلی احتراق گاز طبیعی بر حسب طول کوره در شرایط بدون تزریق هرگونه ماده افزودنی (محصولات احتراق ناقص یا متان) را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل پیداست روند نتایج عددی و آزمایشگاهی با دقت نسبتاً قابل قبولی (خطای حدود ۳۰ درصد) مطابقت دارد. لازم به ذکر است که با توجه به شرایط آزمایشگاهی و محدودیت ابزارهای اندازه‌گیری، برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی به مقایسه‌ی دما بسنده شد.



شکل ۳- دمای خط مرکزی محفظه‌ی اصلی با مش‌بندی مختلف



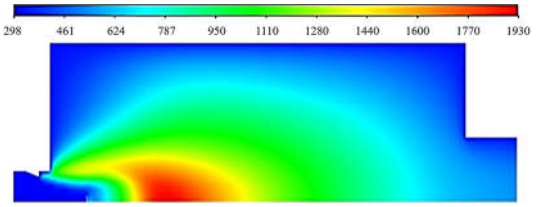
شکل ۴- اعتبارسنجی مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی

تحلیل خطا و عدم قطعیت: منابع اصلی خطاهای آزمایشگاهی شامل دقت ترموکوپل، نوسانات دبی سوخت و هوا، خطای اپراتوری در تنظیم نسبت هم‌ارزی و تزریق افزودنی‌ها، و خطای ابزارهای ثبت داده بودند. عدم قطعیت کلی هر کمیت با استفاده از روش استاندارد «جمع مربعات» محاسبه شده است. براساس این تحلیل، مقادیر عدم قطعیت پارامترهای اصلی اندازه‌گیری‌شده به صورت زیر است:

- عدم قطعیت دمای شعله: ±2.5%
- عدم قطعیت شدت تابش: ±3.2%
- عدم قطعیت غلظت NOx : ±4.1%
- عدم قطعیت غلظت دوده: ±5%

این مقادیر براساس دقت ابزارها از جمله: ترموکوپل سرامیکی با دقت ± 2.5°C و نوسانات دبی اندازه‌گیری شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که محدوده خطا تأثیر معنی‌داری بر روند کلی نتایج گزارش‌شده ندارد و مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی همچنان معتبر است.

نتایج شبیه‌سازی: شکل۵ کانتور دمای احتراق در کوره‌ی اصلی را در حالت بدون هر گونه افزودنی نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود دما در ناحیه‌ی شعله در بیشترین مقدار خود و به رنگ قرمز قرار دارد. برای بررسی دقیق‌تر، در ادامه به بررسی منحنی‌های دما در محور مرکزی کوره پرداخته شده است. این بررسی در حالت‌های مختلف افزودن محصولات احتراق ناقص و متان به شعله ارائه شده است.



شکل ۵- کانتور دما در کوره‌ی اصلی در حالت فرایند احتراق بدون افزودنی‌ها (دما بر حسب کلوین)

شکل ۶ دمای محور مرکزی کوره بر حسب طول کوره را در حالت تزریق ۵ تا ۱۵ درصد حجمی محصولات احتراق ناقص به شعله نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، افزایش مقدار تزریق باعث افزایش بیشینه‌ی دما در شعله شده است. مقادیر دمای بیشینه برای حالات بدون تزریق و تزریق ۵ تا ۱۵ درصد حجمی محصولات احتراق به ترتیب ۱۹۳۰، ۱۹۵۶، ۱۹۶۰ و ۱۹۶۷ کلوین است. افزایش دما در موقعیت ابتدای شعله نیز مشاهده می‌شود. اما دما در انتهای کوره تغییرات چشمگیری ندارد. همچنین موقعیت بیشینه‌ی دما در اثر تزریق محصولات احتراق ناقص به سمت ابتدای شعله جابجا گردید.

محصولات احتراق ناقص شامل موادی مانند مونوکسید کربن و هیدروکربن‌های نسوخته هستند. این مواد به دلیل ناقص بودن احتراق اولیه، هنوز انرژی شیمیایی قابل توجهی دارند. وقتی این مواد وارد شعله شوند و در حضور اکسیژن بسوزند، واکنش‌های شیمیایی جدیدی رخ می‌دهد که گرمای بیشتری تولید می‌کنند. بنابراین بیشینه‌ی دما افزایش می‌یابد. از طرفی محصولات احتراق ناقص معمولاً داغ هستند چون از فرایند احتراق اولیه آمده‌اند، وقتی به شعله اضافه می‌شوند، به دلیل داشتن دمای بالا، نیاز کمتری به گرما برای رسیدن به دمای اشتعال دارند. این موضوع باعث می‌شود که انرژی بیشتری از واکنش شیمیایی آزاد شده و دما بیشتر شود. مواد قابل احتراق موجود در محصولات احتراق ناقص باعث افزایش سرعت واکنش‌های احتراق در شعله می‌شوند. این افزایش سرعت واکنش‌ها باعث آزاد شدن انرژی در زمان کوتاه‌تر شده و دما را به طور موضعی بالاتر می‌برد که دلیل دیگری برای افزایش دما به دلیل افزودن محصولات احتراق ناقص به شعله است. تزریق محصولات احتراق ناقص مانند CO و هیدروکربن‌های نسوخته به شعله باعث می‌شود که دمای بیشینه به ابتدای شعله نزدیک شود. این به دلیل واکنش‌پذیری بالای این مواد است که در حضور اکسیژن سریعاً می‌سوزند و گرمای زیادی آزاد می‌کنند. همچنین، دمای بالای محصولات احتراق ناقص محیط را پیش‌گرم کرده و واکنش‌ها را در نواحی اولیه شعله تسریع می‌کند. در نتیجه، انرژی بیشتری در ابتدای شعله تولید شده و موقعیت بیشینه‌ی دما به آن ناحیه منتقل می‌شود.

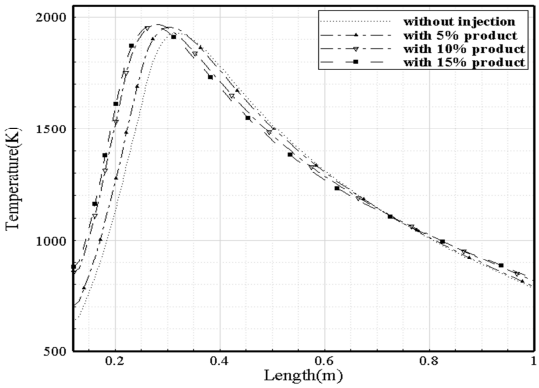
شکل ۷ دمای محور مرکزی محفظه احتراق برحسب طول کوره در حالت تزریق متان با درصدهای حجمی ۵ الی ۱۵ را نشان می‌دهد. بیشینه‌ی دما با افزایش تزریق متان تا ۱۰ درصد حجمی افزایش می‌یابد، اما افزایش بیشتر تزریق تا ۱۵ درصد، باعث کاهش بیشینه‌ی دما می‌شود. اما در هر حال بیشینه‌ی دما نسبت به حالت بدون تزریق بیشتر است. این پدیده به رفتار احتراقی متان، دینامیک شعله و محدودیت‌های موجود در فرایند احتراق مربوط می‌شود. متان به عنوان یک سوخت، انرژی شیمیایی بالایی دارد. تزریق ۵ و ۱۰ درصد متان به

شعله باعث ورود سوخت اضافی می‌شود که در حضور اکسیژن باقیمانده در شعله می‌سوزد و انرژی بیشتری آزاد می‌کند. این انرژی اضافی باعث افزایش دمای بیشینه‌ی شعله و بهبود احتراق می‌گردد. سوخت بیشتر منجر به احتراق بیشتر می‌شود، به ویژه در نواحی‌ای که هنوز اکسیژن کافی موجود است. این باعث افزایش نرخ واکنش‌های شیمیایی و در نتیجه افزایش دمای شعله می‌شود. وقتی میزان تزریق متان از ۱۰ درصد بیشتر می‌شود، مقدار اکسیژن موجود در شعله دیگر برای احتراق کامل تمام متان کافی نیست. این امر باعث می‌شود که بخشی از سوخت تزریق شده نسوخته باقی بماند. در نتیجه، انرژی آزاد شده کاهش یافته و دمای شعله کمتر از مقدار بیشینه‌ی قبلی می‌شود. از طرفی تزریق بیش از حد سوخت علاوه بر رقیق‌سازی و جذب گرما از ناحیه‌ی شعله، می‌تواند ساختار شعله را تغییر داده و اختلاط کافی سوخت و هوا را مختل کند. این اختلال باعث کاهش کارایی واکنش‌های احتراقی و در نتیجه کاهش بیشینه‌ی دما می‌گردد. اما حتی با تزریق ۱۵ درصد متان و کاهش دما نسبت به حالت تزریق ۱۰ درصد، بیشینه‌ی دما هم‌چنان بیشتر از حالت بدون تزریق است. دلیل این موضوع این است که بخشی از متان تزریق شده هم‌چنان می‌سوزد و انرژی بیشتری نسبت به حالت اولیه‌ی بدون تزریق آزاد می‌کند.

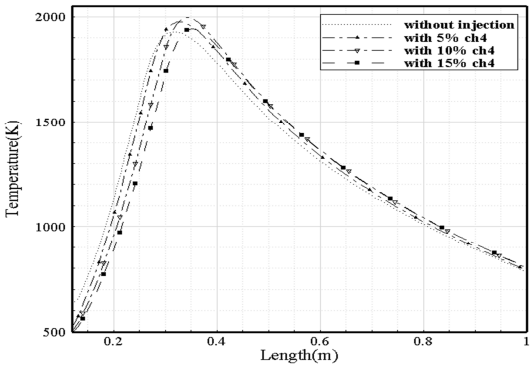
دمای محور مرکزی کوره در حالت تزریق همزمان متان و محصولات احتراق ناقص با درصدهای حجمی یکسان ۵ الی ۲۰ درصد در شکل ۸ نشان داده شده است.

بیشینه‌ی دمای شعله با تزریق افزودنی تا ۱۰ درصد، افزایش و سپس با افزایش تزریق افزودنی تا ۲۰ درصد کاهش یافت. نکته‌ی قابل توجه این است که با افزایش نرخ تزریق افزودنی تا ۲۰ درصد، بیشینه‌ی دمای شعله نه تنها نسبت به مقادیر کمتر تزریق، بلکه حتی در مقایسه با حالت پایه (بدون تزریق) نیز کاهش می‌یابد. این پدیده عمدتاً ناشی از غلبه‌ی اثرات رقیق‌سازی و خنک‌کاری در درصدهای بالای تزریق است. در این شرایط، جریان حجیم افزودنی با کاهش غلظت موضعی اکسیژن، ایجاد بار گرمایی برای پیش گرمایش و اختلال در الگوی اختلاط بهینه، موجب تضعیف احتراق اصلی شده و در نهایت کاهش انرژی آزاد شده و پایین آمدن دمای بیشینه را در پی دارد.

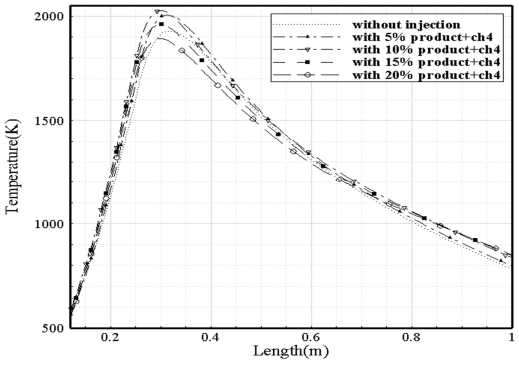
علت افزایش بیشینه‌ی دما در حالت افزودن همزمان متان و محصولات احتراق ناقص این است که تزریق محصولات احتراق ناقص و متان به شعله، عملاً به معنای اضافه کردن سوخت اضافی با گرمای قابل آزاد شدن بالا است. این سوخت اضافی در حضور دمای بالای شعله و اکسیژن می‌سوزد و گرمای بیشتری تولید می‌کند، در نتیجه بیشینه‌ی دمای شعله افزایش می‌یابد.



شکل ۶- دما ی محور مرکزی کوره‌ی اصلی در حالت تزریق محصولات احتراق ناقص به شعله



شکل ۷- دمای محور مرکزی کوره‌ی اصلی در حالت تزریق متان به شعله



شکل ۸- دمای محور مرکزی کوره‌ی اصلی در حالت تزریق همزمان محصولات احتراق ناقص و متان به شعله

با مقایسه‌ی نتایج شکل‌های ۶ تا ۸ مشاهده می‌شود که در حالت افزودن ترکیبی از متان و محصولات احتراق ناقص به شعله بیشینه‌ی دما بیشتر از هر دو حالت دیگر است. زیرا افزودن همزمان افزودنی به معنی افزایش میزان سوخت در شعله نسبت به حالت‌های دیگر است که باعث افزایش واکنش‌های احتراقی و تولید بیشتر گرما می‌شود. در این جا یک اثر هم‌افزایی نیز بین متان و محصولات احتراق ناقص وجود دارد. هر دو سوخت به طور مستقل با اکسیژن واکنش می‌دهند و انرژی آزاد می‌کنند. اثر هم‌افزایی باعث افزایش بیشتر دما نسبت به حالتی می‌شود که تنها یکی از این سوخت‌ها به شعله اضافه شده باشد. افزودن هر دو سوخت متان و محصولات احتراق ناقص به شعله باعث پیش‌گرم

شدن بیشتر ناحیه‌ی شعله نیز می‌شود. این پیش‌گرم شدن باعث می‌شود که سوخت‌ها سریع‌تر بسوزند و دما در نواحی شعله به طور مؤثری افزایش یابد. همچنین افزایش بیشینه‌ی دما در حالت افزودن متان به شعله نسبت به حالت افزودن محصولات احتراق ناقص به شعله بیشتر است. متان یک سوخت پر انرژی است که وقتی با اکسیژن واکنش می‌دهد، انرژی زیادی آزاد می‌کند. زمانی که به شعله افزوده می‌شود، میزان سوخت قابل احتراق افزایش می‌یابد و در نتیجه واکنش‌های احتراقی بیشتری رخ می‌دهد که منجر به تولید گرمای بیشتر می‌شود. از طرفی متان به دلیل اینکه سوخت اصلی و با انرژی بالاست، به طور مؤثر با اکسیژن واکنش می‌دهد و موجب افزایش دما در شعله می‌شود. در این حالت برخلاف حالت افزودن محصولات ناقص احتراق، گازهای خنک‌کننده‌ی کمتری در شعله وجود دارند و انرژی آزاد شده به طور مؤثرتر در شعله منتقل می‌شود. بنابراین افزایش بیشینه‌ی دما بیشتر است.

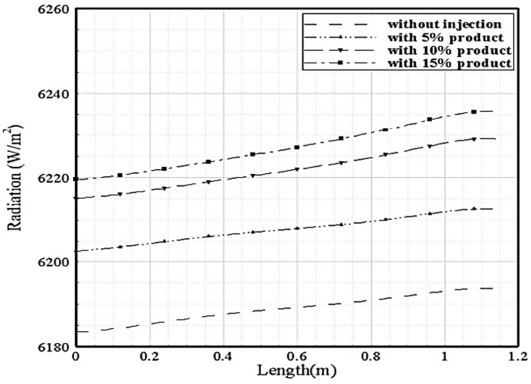
پارامتر مهم و قابل توجه در پژوهش حاضر درخشندگی یا تابش شعله است. شکل ۹ رنگ شعله در حالت‌های با تزریق افزودنی و بدون تزریق افزودنی به شعله را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود رنگ شعله در حالتی که هیچ تزریقی وجود ندارد آبی می‌باشد و رنگ شعله در هنگامی‌که تزریق صورت می‌گیرد از آبی به زرد تغییر کرده و درخشندگی آن نیز افزایش یافته است.

افزودن محصولات احتراق ناقص که در آن سوخت به طور کامل با اکسیژن واکنش نمی‌دهد، متان و یا ترکیبی از این دو می‌تواند باعث تولید سایر ترکیبات کربنی مانند دوده شود. این دوده‌ها مانند کوره‌های گرمایی عمل کرده و نور را به طور مشخص در بخش‌های خاصی از طیف جذب و سپس بازتاب می‌دهد که در نهایت موجب رنگ زرد شعله می‌شود. در شعله‌ی آبی، سوخت به طور کامل با اکسیژن واکنش می‌دهد و نور مرئی عمدتاً از تابش شیمی‌تابی گونه‌های میانی مانند CH در ناحیه‌ی واکنش باریک و با دمای بسیار بالا ناشی می‌شود. اما در شعله‌ی زرد ناشی از تزریق افزودنی، مکانیزم تابش غالب تغییر می‌کند. در این حالت، افزودنی‌ها موجب تشکیل ذرات دوده در نواحی غنی از سوخت می‌شوند. این ذرات در ادامه و در حین حرکت در ساختار شعله، تابش جسم سیاه شدیدی عمدتاً در ناحیه‌ی زرد-قرمز طیف ساطع می‌کنند. اگر چه دمای بیشینه‌ی ناحیه‌ی واکنش اصلی ممکن است افزایش یابد، اما این تابش گسترده و شدید ناشی از دوده است که رنگ شعله را به زرد متمایل کرده و درخشندگی و انتقال گرمای تابشی را به طور محسوسی افزایش می‌دهد.

شکل ۱۰ تابش بر روی دیواره‌ی کوره در حالت تزریق ۵ تا ۱۵ درصد محصولات احتراق ناقص را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود تزریق باعث افزایش میزان تابش شده است. علت افزایش مقدار تابش، انتشار بیشتر دوده به دلیل افزودن محصولات احتراق CBF به کوره‌ی اصلی است. افزایش میزان دوده در شعله با تغییر رنگ شعله از آبی به زرد منجر به افزایش میزان تابش می‌گردد. علاوه بر این میزان تابش با حرکت در طول کوره افزایش می‌یابد (شکل ۱۰). روند افزایشی شار تابش بر روی دیواره در طول کوره، با وجود کاهش دمای گاز، ناشی از تغییرات فضایی در خواص تابشی محیط است. در حل پایا، توزیع غلظت ذرات دوده در راستای کوره یکنواخت نبوده و در نواحی پایین دست، حجم کسری این ذرات تابنده به طور محسوسی افزایش می‌یابد. از آن جا که ذرات دوده دارای ضریب صدور بسیار بالاتری نسبت به گازهای احتراق هستند، این افزایش غلظت فضایی ذرات منجر به افزایش ضریب صدور مؤثر محیط در نواحی انتهایی کوره می‌گردد. در نتیجه، این افزایش در ضریب صدور بر اثر کاهش دما غلبه کرده و شار تابشی خالص دریافتی توسط دیواره را در راستای طول کوره افزایش می‌دهد.

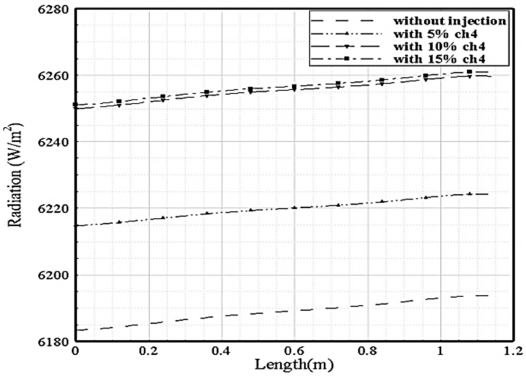
الف ب

شکل ۹- رنگ شعله الف) در حالت بدون تزریق افزودنی ب) در حالت با تزریق افزودنی



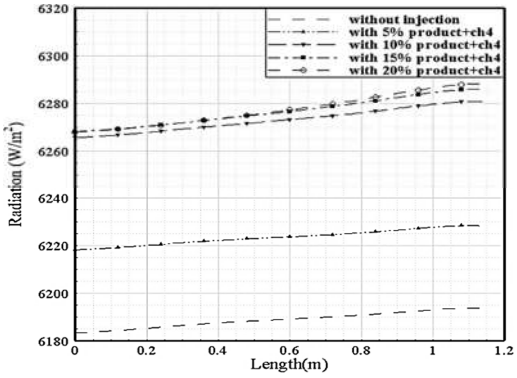
شکل ۱۰- تابش شعله بر روی دیواره کوره در حالت تزریق محصولات احتراق ناقص به شعله

بررسی میزان تابش بر روی دیواره‌ی کوره در حالت تزریق ۵ تا ۱۵ درصد متان به شعله در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این حالت نیز تزریق باعث افزایش میزان تابش شده است. علت افزایش مقدار تابش، افزایش دما به دلیل تزریق است. در دمای بالاتر، احتراق متان می‌تواند باعث تولید رادیکال‌های آزاد مثل CH_3 و CH_2O شود. این رادیکال‌ها می‌توانند عملکرد تابشی شعله را تقویت کنند. علاوه بر آن افزودن متان باعث تغییر در خواص سیال، مانند تغییر در چگالی و سرعت گازهای شعله، می‌گردد. این تغییرات می‌توانند منجر به اختلاط بهتر گازها و توزیع یکنواخت‌تر دما در شعله شوند که در نهایت به افزایش تابش کمک می‌کند. از طرفی متان به دلیل ویژگی‌های شیمیایی خاص خود می‌تواند باعث تولید دوده شود. دوده‌ها و ذرات معلق نقش زیادی در افزایش تابش دارند. زیرا توانایی جذب انرژی تابشی را دارند و به نوعی پرتاب دوباره‌ی تابش می‌کنند.



شکل ۱۱- تابش شعله بر روی دیواره کوره در حالت تزریق متان به شعله

شکل ۱۲ حالتی را نشان می‌دهد که در آن ترکیبی از محصولات ناقص احتراق و متان به طور همزمان به شعله افزوده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، مقدار تابش با افزایش مقدار تزریق افزایش یافته است. افزودن همزمان محصولات احتراق ناقص و متان به شعله باعث افزایش دمای شعله، تولید دوده، ذرات معلق و افزایش گازهای تابشی مانند CO و CO_2 می‌شود که باعث بهبود اختلاط گازها و افزایش انتقال گرمای تابشی به محیط می‌گردد. به طور کلی، این عوامل موجب افزایش شدت تابش گرمایی از شعله و انتقال انرژی بیشتر به اطراف می‌شوند.

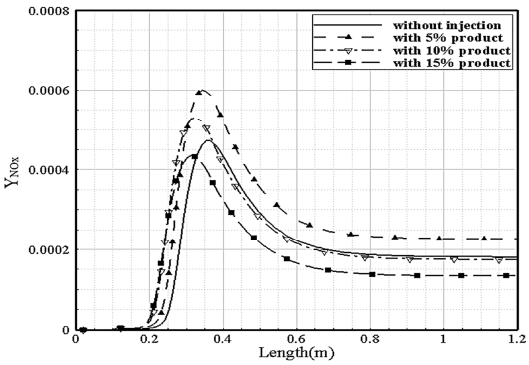


شکل ۱۲- تابش شعله بر روی دیواره کوره در حالت تزریق همزمان محصولات احتراق ناقص و متان به شعله

مقایسه‌ی شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نشان می‌دهد که به طور کلی میزان تابش در حالت تزریق همزمان محصولات احتراق ناقص و متان بیشتر از حالتی است که متان به تنهایی تزریق می‌شود. همچنین مقدار این پارامتر مهم در حالت تزریق متان به تنهایی بیشتر از حالت تزریق محصولات احتراق ناقص به تنهایی است. به دلیل ترکیب اثرات افزایشی دما در حالت تزریق همزمان محصولات احتراق ناقص و متان، تولید دوده و ذرات معلق و همچنین تولید گازهای تابشی مانند CO افزایش یافته و اختلاط گازها بهبود می‌یابد. این عوامل باعث افزایش دمای شعله و تابش گرمایی بیشتر می‌شوند. در حالی که در حالت‌های تزریق محصولات ناقص احتراق و متان به طور جداگانه این اثرات کمتر به چشم می‌آید.

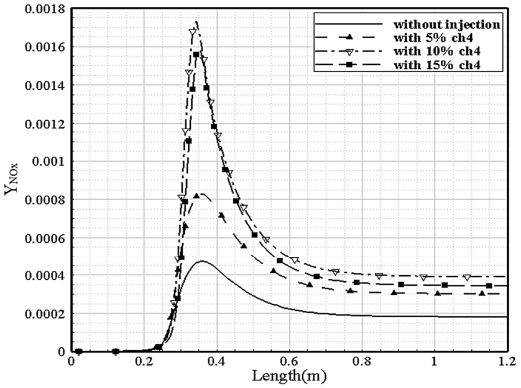
در ادامه نتایج انتشار آلاینده‌های مهم از جمله NOx و دوده ارائه گردیده است. شکل ۱۳ کسر جرمی اکسیدهای نیتروژن برای حالت تزریق محصولات احتراق ناقص به شعله را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، مقدار بیشینه‌ی انتشار آلاینده ابتدا با تزریق تا ۵ درصد افزایش و سپس با افزایش مقدار تزریق افزودنی تا ۱۵ درصد، کاهش یافته است.

در ابتدا افزودن ۵ درصد محصولات احتراق ناقص باعث افزایش دمای شعله می‌شود که به دلیل ایجاد دمای بالاتر در شعله است. دمای بالاتر باعث افزایش سرعت واکنش‌های شیمیایی و تولید بیشتر NOx می‌شود، زیرا تولید NOx به شدت به دما حساس است. با افزایش بیشتر محصولات احتراق ناقص تا ۱۰ و ۱۵ درصد، این ترکیبات باعث می‌شوند که احتراق ناقص اتفاق افتاده و در نتیجه، دما به طور نسبی کاهش یابد. محصولات احتراق ناقص مانند CO و H_2 کمتر واکنش‌های اکسیداسیونی تولید NOx را تحریک می‌کنند. این گازها به عنوان گازهای رقابتی با اکسیژن برای واکنش‌های تولید NOx عمل کرده و مانع از ایجاد شرایط مناسب برای تولید NOx بیشتر می‌شوند. به عبارت دیگر، در دماهای پایین‌تر و در شرایط احتراق ناقص، تولید NOx کاهش می‌یابد.



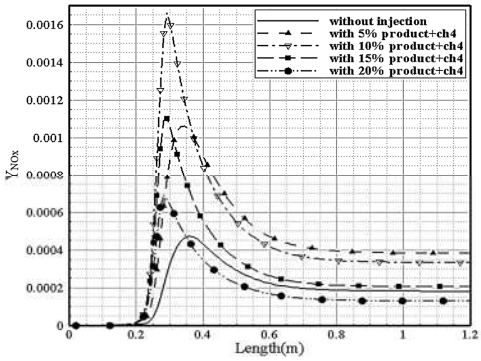
شکل ۱۳- کسر جرمی گونه‌ی NO_x در محور مرکزی کوره در حالت تزریق محصولات احتراق ناقص به شعله

اثر افزودن متان به شعله بر انتشار NOx در شکل ۱۴ نشان داده شده است. تزریق متان به شعله تا مقدار ۱۰ درصد باعث افزایش انتشار NOx و افزایش بیشتر تا ۱۵ درصد باعث کاهش انتشار NOx می‌شود. افزودن ۵ و ۱۰ درصد متان به شعله باعث افزایش دما و در نتیجه تولید بیشتر NOx می‌شود، زیرا احتراق کامل متان در دمای بالا انجام می‌شود و منجر به تولید NOx بیشتر می‌شود. اما با افزودن ۱۵ درصد متان، احتراق ناقص افزایش یافته و دما کاهش می‌یابد. این کاهش دما باعث کاهش تولید NOx می‌شود، زیرا در دماهای پایین‌تر واکنش‌های تولید NOx کاهش یافته و گازهایی مانند CO و H_2 تولید شده که باعث انتشار NOx کمتر می‌شود.



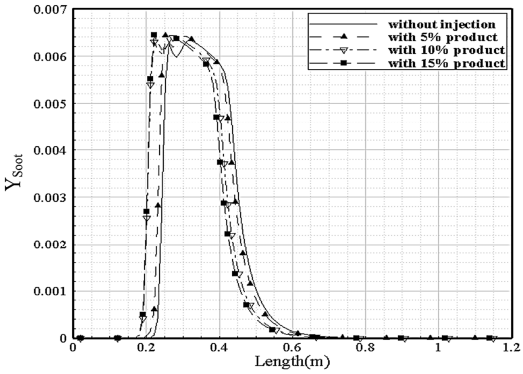
شکل ۱۴- کسر جرمی گونه‌ی NO_x در محور مرکزی کوره-در حالت تزریق متان به شعله

اثر افزایش همزمان افزودن محصولات احتراق ناقص و متان به شعله بر انتشار NOx در شکل ۱۵ بررسی شده است. در روندی مشابه با حالت قبل، میزان انتشار NOx با افزایش مقدار افزودنی تا ۱۰ درصد، افزایش یافته و سپس با افزایش افزودنی تا مقدار ۱۵ درصد، کاهش می‌یابد. افزودن ۵ و ۱۰ درصد محصولات احتراق ناقص و متان به طور همزمان باعث افزایش دما و تولید بیشتر NOx گردید، زیرا دمای بالاتر موجب تشدید واکنش‌های انتشار NOx می‌شود. اما با افزایش ۱۵ درصد این افزودنی‌ها، احتراق ناقص شدت می‌گیرد که باعث کاهش دما و در نتیجه کاهش انتشار NOx می‌شود. همچنین، افزایش درصد افزودنی‌ها منجر به رقابت بیشتر بین گازهای مختلف برای واکنش با اکسیژن می‌شود که انتشار NOx را کاهش می‌دهد.



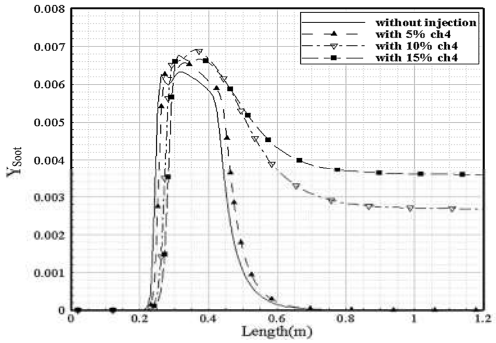
شکل ۱۵- کسر جرمی گونه‌ی NO_x در محور مرکزی کوره در حالت تزریق همزمان محصولات احتراق ناقص و متان به شعله

شکل ۱۶ تغییرات میزان انتشار دوده بر اثر افزودن محصولات احتراق ناقص به شعله را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود مقدار بیشینه‌ی انتشار دوده در درصدهای مختلف افزودنی، اختلاف چشمگیری ندارد و یا به عبارتی تزریق محصولات احتراق ناقص به شعله تاثیر چندانی بر میزان انتشار دوده ندارد. محصولات احتراق ناقص مانند CO و H_2 بیشتر به کاهش اکسیژن و ایجاد شرایط احتراق ناقص کمک می‌کنند، اما خود این محصولات باعث تولید دوده نمی‌شوند. در واقع، گازهایی مانند CO و H_2 ممکن است به جای دوده به عنوان سوخت‌های اضافی وارد فرایند شوند و به تنهایی باعث تشکیل دوده نمی‌شوند.

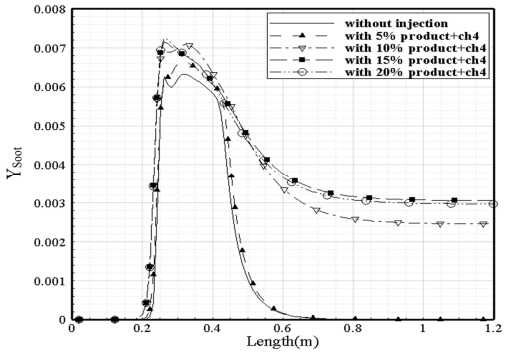


شکل ۱۶- کسر جرمی دوده در محور مرکزی کوره در حالت تزریق محصولات احتراق ناقص به شعله

افزودن درصدهای مختلف متان به شعله‌ی گاز طبیعی و تاثیر آن بر میزان انتشار دوده در شکل ۱۷ نشان داده شده است. به طور کلی افزایش درصد متان در شعله‌ی گاز طبیعی باعث افزایش انتشار دوده می‌شود، زیرا متان می‌تواند شرایط احتراق ناقص ایجاد کرده که در آن شرایط، سوخت به طور کامل نمی‌سوزد و دوده تولید می‌شود. این شرایط معمولاً به دلیل کاهش میزان اکسیژن و ایجاد نقاط دمای پایین‌تر در شعله است که در آن متان به طور کامل نمی‌سوزد و به جای آن ذرات کربنی یعنی دوده تولید می‌شود. بنابراین، افزایش متان در شعله می‌تواند به تشکیل بیشتر دوده منجر شود.



شکل ۱۷- کسر جرمی دوده در محور مرکزی کوره در حالت تزریق متان به شعله



شکل ۱۸- کسر جرمی دوده در محور مرکزی کوره در حالت تزریق همزمان محصولات احتراق ناقص و متان به شعله

بیشترین میزان انتشار دوده در حالت افزودن همزمان محصولات احتراق ناقص و متان به شعله‌ی گاز طبیعی رخ می‌دهد (شکل ۱۸). زیرا این ترکیب شرایط ایده‌آلی برای تولید دوده ایجاد می‌کند. محصولات احتراق ناقص مانند CO و H_2 باعث کاهش اکسیژن و ایجاد احتراق ناقص می‌شوند که به تولید دوده منجر می‌شود (خود این محصولات باعث تولید دوده نمی‌شوند)، در حالی که افزودن متان باعث افزایش کربن در شعله می‌شود که به تبدیل آن به ذرات دوده می‌انجامد. ترکیب این دو عامل باعث تولید بیشترین مقدار دوده در شعله می‌شود.

در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ مشاهده می‌شود که در حالت بدون تزریق، مقدار دوده در محور مرکزی شعله در فاصله‌ی حدود ۰٫۳ متر از ورودی، دارای یک نقطه‌ی کمینه است. این رفتار ناشی از ترکیب دو سازوکار اصلی است. نخست آن که در این ناحیه دمای گاز و غلظت رادیکال‌های اکسیدکننده نظیر OH نسبتاً بالا بوده و بنابراین نرخ اکسیداسیون دوده از نرخ تشکیل آن فراتر می‌رود و کاهش محلی در کسر جرمی دوده رخ می‌دهد.

دوم آن که ساختار جریان در این بخش به گونه‌ای است که بخشی از ذرات دوده از محور مرکزی به نواحی اطراف شعله انتقال می‌یابد و توزیع شعاعی دوده را نامتقارن می‌کند. ترکیب این دو عامل باعث ایجاد یک کمینه‌ی مشخص در محور مرکزی شعله می‌شود که یک رفتار فیزیکی طبیعی برای شعله‌ی بدون تزریق سوخت یا محصولات احتراق است.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر افزودن محصولات احتراق ناقص و متان بر دما، تابش و انتشار آلاینده‌ها در شعله‌ی گاز طبیعی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی شعله‌ی گاز طبیعی از طریق یک مشعل و به کمک دو کوره‌ی اصلی و فرعی حاصل شد. شبیه‌سازی عددی نیز با استفاده از نرم‌افزار Ansys Fluent صورت پذیرفت. درصدهای مختلف محصولات احتراق ناقص و متان و نیز ترکیبی از این دو به شعله افزوده شد و نتایج مهم زیر به دست آمد.

- نتایج شبیه‌سازی عددی منحنی دما در طول کوره‌ی اصلی با نتایج به دست آمده از آزمایشات تطابق نسبتاً خوبی داشت.
- به طور کلی میانگین بیشینه‌ی دما در حالت تزریق همزمان محصولات احتراق ناقص و متان از حالت تزریق متان به تنهایی بیشتر است. همچنین میانگین بیشینه‌ی دما در حالت تزریق متان از حالت تزریق محصولات احتراق ناقص به تنهایی بیشتر است.
- به طور کلی میزان تابش در حالت تزریق همزمان محصولات احتراق ناقص و متان بیشتر از حالتی است که متان به تنهایی تزریق می‌شود.
- در حالت افزودن محصولات احتراق ناقص به شعله، مقدار بیشینه‌ی انتشار آلاینده‌ی NOx ابتدا با تزریق تا مقدار ۵ درصد، افزایش و سپس با افزایش مقدار تزریق افزودنی تا مقدار ۱۵ درصد، کاهش یافت. تزریق متان به تنهایی یا تزریق همزمان محصولات احتراق ناقص و متان به طور همزمان به شعله تا مقدار ۱۰ درصد باعث افزایش انتشار NOx و افزایش بیشتر تا ۱۵ درصد باعث کاهش انتشار NOx گردید.
- تزریق محصولات احتراق ناقص به شعله تاثیر چندانی بر میزان انتشار دوده نداشت. افزایش درصد متان در شعله‌ی گاز طبیعی باعث افزایش انتشار دوده گردید. بیشترین میزان انتشار دوده در حالت افزودن همزمان محصولات احتراق ناقص و متان به شعله‌ی گاز طبیعی رخ داد.

۷- مراجع

[1] Shi B, Hu J, Peng H and Ishizaka S. Effects of internal flue gas recirculation rate on the NOx emission in a methane/air premixed flame. Combust Flame. 2018;188:199–211.

[۲] جوادی س م و مقیمان م. اندازه‌گیری آزمایشگاهی اثر افزایش دمای سوخت گاز طبیعی بر درخشندگی شعله و انتشار آلاینده NO در یک دیگ ۱۲۰ کیلوواتی. نشریه علمی-پژوهشی سوخت و احتراق. ۱۳۹۰؛۴(۱).

[3] Fordoei E, Ebrahimi K, Mazaheri K and Mohammadpour A. Numerical study on the heat transfer characteristics, flame structure, and pollutants emission in the MILD methane-air, oxygen-enriched and oxy-methane combustion. Energy. 2021;218:119524.

[4] Duva BC, Chance LE and Toulson E. Dilution effect of different combustion residuals on laminar burning velocities and burned gas Markstein lengths of premixed methane/air mixtures at elevated temperature. Fuel. 2020;267:117153.

[5] Si J, Wang G, Shu Z, Liu X, Wu M, Zhu R and Mi J. Experimental and numerical study on moderate or intense low-oxygen dilution oxy-combustion of methane in a laboratory-scale furnace under N2, CO2, and H2O dilutions. Energy Fuels. 2021;35(15):12403–12415.

[6] Cecere D, Carpenella S, Giacomazzi E, Stagni A and Di Nardo A, Calchetti G. Effects of hydrogen blending and exhaust gas recirculation on NOx emissions in laminar and turbulent CH4/Air flames at 25 bar. International journal of hydrogen energy. 2024 Jan 2;49:1205-22.

[7] Chu C, Scialabba G, Liu P, Serrano-Bayona R, Aydin FY and Pitsch H, Roberts WL. Effects of Ammonia Substitution in the Fuel Stream and Exhaust Gas Recirculation on Extinction Limits of Non-premixed Methane– and Ethylene–Air Counterflow Flames. Energy & Fuels. 2023;37(18):14393-403.

[8] Abuelnour MA, Said MF and Abuelnuor AAA. Numerical investigation of hydrogen-diesel dual fuel engine: Combustion and emissions characteristics under varying hydrogen concentration and exhaust gas recirculation. Fuel. 2024;377:132794.

[9] Shu J, Fu J, Yang W, Huang J, He T and Liu J. Experimental and computational study on the effects of exhaust gas recirculation on thermodynamics, combustion and emission characteristics of a diesel pilot ignition natural gas engine. Sustainable Energy & Fuels. 2024;8(16):3630-44.

[10] Farrokhi FY, Piscopo A, Pappa A and Parente A, De Paepe W. Emissions and Flame Stability Assessment of Hydrogen Addition and Air Dilution in a Microgas Turbine Combustor Using Zero-Dimensional/One-Dimensional Modeling by Chemical Reactor Network. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2025 Jul 1;147(7):071002.

[11] Wang Z, Zhao H, Liu M, Song M, Fan L and Feng L. Study on the effect and mechanism of EGR on methane/hydrogen pre-ignition caused by cylinder lubricating oil auto-ignition. Applied Thermal Engineering. 2025 Jan 15;259:124965.