

تأثیر پارامترهای عملکردی شامل توان، نسبت سوخت به هوا و ترکیب گاز سنتز بر شرایط حرارتی و ساختار شعله در رژیم‌های احتراقی مایلد و دما بالا

احمد شاکر^۱، سید عبدالمهدی هاشمی^{۲*}، اسماعیل ابراهیمی فردویی^۳

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ahmadshaker68@gmail.com

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، hasheimi@kashanu.ac.ir

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش، ebrahimifordoei@tafreshu.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۳/۰۶/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱)

چکیده: هدف از پژوهش حاضر، مطالعه تأثیر پارامترهای عملکردی شامل توان، نسبت سوخت به هوا و ترکیب گاز سنتز روی شرایط حرارتی و ساختار شعله در دو رژیم احتراقی مایلد و دما بالا است. بدین منظور از شبیه‌سازی کوره احتراقی دانشگاه لیسبون با استفاده از مدل آشفتگی K-ε استاندارد و مدل احتراقی مفهومی اتلاف گردابه اصلاح شده استفاده شده است. پارامترهای عملکردی مورد بررسی شامل توان‌های کوره ۵ و ۱۶ کیلووات، نسبت‌های سوخت به هوای ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ و نسبت کسر جرمی‌های هیدروژن به مونوکسید کربن ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که تحت رژیم مایلد توزیع دما یکنواخت‌تر از رژیم دما بالا بوده و تشکیل رژیم مایلد مستلزم تأخیر در اشتعال به‌منظور رسیدن به سطح قابل‌توجهی از رقیق‌سازی مخلوط احتراقی است. همچنین افزایش توان، تسهیل در تشکیل رژیم مایلد را به همراه داشته، در حالی‌که افزایش هیدروژن سوخت در توان کوره ثابت به علت کاهش سرعت جریان سوخت و در نتیجه کاهش نرخ بازچرخش محصولات احتراقی منجر به انتقال به رژیم دما بالا می‌شود. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، در صورت تغییر قابل توجه در شرایط عملکردی مورد بررسی، لازم است تا طراحی کوره برای دستیابی به رژیم مایلد اصلاح شود.

کلیدواژگان: رژیم مایلد، احتراق دما بالا، توزیع دما، احتراق گاز سنتز، ساختار شعله.

مقدمه

افزایش قابل‌توجهی در تقاضای انرژی در هر دو بخش صنعتی و خانگی در سطح جهان وجود دارد. عمده‌ترین آسیب‌های استفاده از سوخت‌های فسیلی، افزایش گرمایش جهانی و آلودگی محیط‌زیست است. مقررات انتشار آلاینده‌ها از کاربردهای مختلف تولید انرژی سخت‌گیرانه شده‌اند. این مسئله سبب شده است تحقیقات وسیعی در زمینه احتراق پاک صورت گیرد. یکی از سوخت‌های موردنظر سوخت گاز سنتز است. گاز سنتز یک مخلوط سوخت گازی کم کربن است که عمدتاً از H_2 و CO با ناخالصی‌های کوچک مانند CH_4 ، C_2H_4 و غیره تشکیل شده است. سوخت کم کالری گاز سنتز توجه زیادی را به خود جلب کرده است که امروزه به دلیل ذخایر زیاد و محتوای انرژی بالا، یکی از منابع انرژی جایگزین سوخت‌های فسیلی تلقی شده و تحقیق روی آن به‌عنوان یک جانشین امیدوارکننده جهت رفع مشکلات مذکور در حال انجام است. حمدی و همکاران [۱] به ویژگی‌های احتراقی گاز سنتز تحت شرایط احتراق سوخت-اکسیژن در شرایط رقیق‌سازی صورت گرفته با گونه CO_2 پرداخته‌اند. در این پژوهش، برای طیف وسیعی از ترکیبات گاز سنتز با سرعت جریان ورودی ۶ متر بر ثانیه، نسبت هم‌ارزی ۰/۴۲ و کسر مولی ۶۰ درصد برای اکسیژن در ترکیب اکسیدکننده مدل‌سازی انجام شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد افزایش

کسر مولی H_2 در ساختار سوخت، منجر به افزایش سرعت شعله و دما شده، اما با کاهش قدرت همراه است. درحالی که سرعت شعله، دما و توان با افزایش کسر مولی گونه CO در ترکیب سوخت کاهش یافته است. چاوس و درایر [۲] مطالعات تجربی خود را در مورد احتراق گاز سنتز در فشارهای بالا و دماهای نسبتاً پایین (مشابه شرایطی که معمولاً در توربین‌های گازی رخ می‌دهد) ارائه نموده و سینتیک شیمیایی گاز سنتز را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. آن‌ها به اهمیت واکنش‌های اولیه شامل گونه‌های HO_2 و H_2O_2 اشاره کرده‌اند. این گروه همچنین گزارش داده‌اند که رفتار مشابهی از مخلوط‌های گاز سنتز با تفاوت‌های جزئی از حضور مونوکسید کربن در ساختار سوخت، در نتیجه مکانیزم‌های سینتیک شیمیایی هیدروژن-اکسیژن به دست می‌آید. در واقع نتایج ایشان نشان می‌دهد که سطح بالای هیدروژن در ساختار سوخت، منجر به رفتار تقریباً یکسان در فرآیندهای احتراقی می‌شود. در مقاله وانگ و همکاران [۳]، اثرات افزودن متان بر ویژگی‌های احتراق شعله جریان آرام گاز سنتز با محتوی H_2 بالا (نسبت سوخت H_2/CO برابر ۳) با آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی تحت رقیق‌سازی N_2 و CO_2 مورد بررسی واقع شده است. بررسی‌ها مشخص می‌کند که افزودن CH_4 به سوخت گاز سنتز، سرعت سوختن آرام را کاهش داده، اما پایداری شعله را بهبود بخشیده است. همچنین در رقیق‌سازی با گونه CO_2 نسبت به گونه N_2 ، شعله پایدارتر بوده و تولید NO روند کاهشی داشته است.

بدون شک دستیابی به احتراق مایلد (MILD)، توجه روزافزونی را به خود جلب کرده است. این میزان از توجه محققین به دلیل ویژگی‌های این احتراق شامل بازده بالا و انتشار پایین آلاینده NO است. در واقع احتراق MILD یک فناوری احتراق به روز است که علاوه بر موارد مذکور، ایجاد شار حرارتی یکنواخت در محفظه احتراق [۴] و سرعت واکنش پایین [۵] را منجر می‌شود. از طرفی، گاز سنتز حاوی مقدار قابل توجهی H_2 دارای زمان تأخیر احتراق کوتاه و دمای شعله آدیاباتیک بالا بوده و می‌توان با استفاده از آن تحت رژیم احتراق MILD نتایج مؤثری جهت غلبه بر چالش‌های فرآیندهای احتراقی به دست آورد [۶]. به عبارت دیگر، ترکیب هر دو رویکرد ذکر شده با هم (یعنی رژیم احتراق MILD و غنی‌سازی هیدروژن سوخت‌های گاز سنتز) برای داشتن احتراق تمیزتر و کارآمدتر با حساسیت کمتر نسبت به ترکیب سوخت، توسط ایشان پیشنهاد شده است. خبازیان و همکاران [۷] به‌طور تجربی و عددی تأثیر دمای پیش‌گرمایش بر انتشار NO تحت احتراق MILD در مشعل حرارتی با توان ۱۰۰ کیلووات را بررسی کرده‌اند. به‌منظور ارزیابی نتایج عددی از آنالیز واکنشگاه اختلاط ایده‌آل در شرایط غیر آدیاباتیک دیواره کوره استفاده شده است. ایشان نشان دادند که با ایجاد نقشه احتراق جدید، کاهش ۱۳ درصدی در تولید آلاینده NO و بهبود ۱۰ درصدی در راندمان مشاهده می‌شود. عملکرد حرارتی کوره غیر پیش‌آمیخته و پایداری شعله تحت تأثیر دمای دیواره کوره برای شرایط مختلف احتراقی توسط ژو و همکاران [۸] به‌صورت عددی و تجربی ارزیابی شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، انتقال از رژیم احتراق معمولی به رژیم احتراق MILD با کاهش دمای دیواره امکان‌پذیر است. این موضوع به نوبه خود منجر به کاهش میزان تولید آلاینده NO نیز خواهد شد. لازم به ذکر است حد دمای کمینه‌ای وجود دارد که در مقادیر کمتر از آن، امکان دستیابی به شرایط احتراق MILD فراهم نمی‌شود. همچنین نتایج بیانگر این مطلب است که افزایش دمای دیواره منجر به کاهش اتلاف حرارت از دیواره کوره و کاهش زمان تأخیر در اشتعال می‌شود. بویاقچی و همکاران [۹] در پژوهش خود به بررسی اثر شرایط حرارتی دیواره کوره بر انتشار NO در دماهای ورودی مختلف و سطوح مختلف رقیق‌سازی اکسیدکننده پرداخته‌اند. ایشان دریافتند که تلفات حرارتی بالاتر از دیوار و جایگزینی بیشتر CO_2 با N_2 ، استقرار رژیم MILD و کاهش قابل توجه تولید NO را تسهیل می‌کند. مکانیزم‌های غالب در انتشار NO تحت شرایط احتراق MILD، مکانیزم سریع از طریق واکنش $CH+N_2 \rightleftharpoons HCN+N$ و مکانیزم حرارتی برای شرایط سوخت-هوا و مکانیزم N_2O -میانی توسط واکنش‌های $N_2O+O \rightleftharpoons 2NO$ و $N_2O+H \rightleftharpoons N_2+OH$ و مکانیزم حرارتی برای احتراق سوخت-اکسیژن معرفی شده است.

از لحاظ محاسبات سینتیکی، اثرات فیزیکی و شیمیایی حضور گونه CO_2 در ساختار اکسیدکننده را می‌توان آنالیز نمود. به‌عنوان نمونه، لیو و همکاران [۱۰] به‌صورت تجربی و عددی، تحقیق خود را مبنی بر بررسی سینتیکی تأثیر جایگزینی CO_2 با N_2 در راستای مطالعه تأخیر در اشتعال احتراق سوخت CH_4 تحت فشارها و دماهای ورودی مختلف انجام داده‌اند. نتایج تأکید

می‌کند که اثرات شیمیایی جایگزینی CO_2 با N_2 منجر به تغییرات اساسی در مقدار تأخیر در اشتعال برای فشارها و دماهای مختلف شده، درحالی‌که اثرات فیزیکی تأثیر ناچیزی بر مقدار این پارامتر دارند. علاوه بر این، کاهش فشار از طریق مسیر $2\text{CH}_3(+M) \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_6(+M)$ منجر به افزایش زمان تأخیر در اشتعال شده و افزایش دما منجر به فعال‌سازی بیشتر مسیر $\text{HCO}+M \rightleftharpoons \text{H}+\text{CO}+M$ گشته و این بدان معنی است کاهش زمان تأخیر در اشتعال را به همراه دارد. این موضوع را می‌توان با اعمال گونه خنثی VCO_2 در محاسبات سینتیکی نیز ارزیابی نمود. گونه مذکور خواص فیزیکی مشابه CO_2 را داشته ولی در واکنش‌های شیمیایی حضور ندارد. تفاوت نتایج به‌دست‌آمده بین شرایط به‌کارگیری گونه VCO_2 و N_2 بیانگر اثرات فیزیکی و تفاوت نتایج استفاده از گونه VCO_2 و CO_2 بیانگر اثرات شیمیایی مربوطه است [۱۱].

ترکیب اکسند پارامتر مهم دیگری است که اخیراً برای کاهش انتشار آلاینده‌ها، گازهای گلخانه‌ای و رفتار شعله در کوره‌ها موردتوجه قرار گرفته است. سورنتینو و همکاران [۱۲] اثر پارامترهای متعدد از جمله سطح رقیق‌سازی و ترکیب مخلوط ورودی را بر انتشار NO در پیکربندی مشعل سیکلونی ارزیابی نموده‌اند. آن‌ها بیان کردند که میزان تولید آلاینده NO به‌تدریج بر اساس کاهش دمای سیستم با افزایش سطح رقیق‌سازی ($X_{\text{N}_2} > 0.84$) کاهش می‌یابد، درحالی‌که افزایش سطح اکسیژن در ترکیبات اکسیدکننده منجر به تقویت انتشار NO ، به‌ویژه از طریق مکانیزم حرارتی می‌شود. مطالعه ساختار شعله سوخت گاز سنتز تحت شرایط سوخت-اکسیژن، اکسیژن غنی و سوخت-هوا توسط شاکر و همکاران [۱۳] انجام شده است. در تحقیقات این گروه کسر مولی اکسیژن در ساختار اکسیدکننده نیز موردتوجه قرار گرفته است. نتایج ایشان حاکی از این مطلب است که در سطح غلظت پایین اکسیژن، اثرات فیزیکی جایگزینی CO_2 با N_2 در بررسی ساختار شعله غالب است. ارتقای سطح غلظت اکسیژن سبب شده است تا سهم تأثیرات شیمیایی و فیزیکی در تولید گونه رادیکال هیدروکسیل مشابه شوند. در مطالعه دیگری گوئودونگ و همکاران [۱۴] نتایج مکانیزم‌های تولید NO را برای شبیه‌سازی احتراق جریان متقابل با ترکیب سوخت H_2/CO و استفاده از گونه‌های رقیق‌کننده $\text{N}_2/\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ گزارش کرده‌اند. در این پژوهش نیز اثرات تغییرات کسر حجمی اکسیژن بررسی شده است آن‌ها با مقدار کم نسبت سوخت $\text{H}_2/\text{CO} < 0.25$ و کسر حجمی پایین اکسیژن ($X_{\text{O}_2} < 15\%$) استنباط کردند که انتشار آلاینده NO تحت رژیم MILD به حداقل می‌رسد. مهرگان و همکاران [۱۵] تأثیر غلظت اکسیژن، دمای پیش‌گرمایش و گونه‌های رقیق‌سازی را بر انتشار آلاینده NO در رژیم احتراق مایلد به‌صورت عددی ارزیابی کرده‌اند. آن‌ها اهمیت این سه عامل را در تشکیل آلاینده NO در قالب نسبت مشارکت تعیین نموده‌اند. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که نسبت سهم غلظت اکسیژن و دمای پیش‌گرمایش ورودی به ترتیب ۵۷ درصد و ۳۲ درصد است. علاوه بر این، آن‌ها اشاره کردند که N_2 یک گونه رقیق‌سازی بهینه است، درحالی‌که جهت به حداقل رساندن انتشار آلاینده NO مقادیر توصیه شده برای کسر مولی اکسیژن ۵ درصد و میزان دمای پیش‌گرمایش ۹۰۰ کلوین است.

با توجه به مطالب بیان شده، اغلب پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با احتراق گاز سنتز تحت رژیم مایلد یا دما بالا مربوط به بررسی شرایط ساختار شعله و تأخیر در اشتعال بدون توجه به شرایط عملکردی و ثابت نگه‌داشتن آن‌ها در بررسی متغیرهای مختلف است. شرایط عملکردی از جمله توان کوره، نسبت سوخت به هوا و ترکیب سوخت گاز سنتز تأثیر به‌سزایی در شرایط حرارتی و ساختار شعله تحت شرایط احتراق مایلد و دما بالا دارند. از این‌رو در مطالعه حاضر به بررسی تأثیر پارامترهای عملکردی مستقل (تغییر هر پارامتر عملکردی با ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها انجام شده است) روی شرایط حرارتی و ساختار شعله تحت رژیم‌های مایلد و دما بالا انجام شده است. بدین منظور شبیه‌سازی کوره احتراق دانشگاه لیسبون با توجه به وجود داده‌های تجربی در هر دو رژیم دما بالا و مایلد برای آن موردتوجه قرار گرفته است. در تحقیق جاری به این منظور بررسی توزیع دما به‌منظور بررسی شرایط حرارتی به همراه توزیع گونه رادیکال هیدروکسیل جهت بررسی ساختار شعله و تغییرات تأخیر در اشتعال برای شرایط مختلف بررسی شده است.

معادلات حاکم، هندسه و روش حل عددی

در مطالعه جاری جهت شبیه‌سازی عددی و اعتبارسنجی از کوره آزمایشگاهی دانشگاه لیسبون [۱۶] مطابق شکل ۱ استفاده شده است. هوا از طریق لوله حلقوی جنب ورودی سوخت با شعاع داخلی و خارجی به ترتیب ۳ و ۷/۵ میلی‌متر به محفظه احتراق وارد می‌شود. مجرای میانی کوره به شعاع ۲ میلی‌متر و طول ۲۱ میلی‌متر جهت تزریق سوخت است. به‌منظور پیاده‌سازی اعتبارسنجی لازم جهت شبیه‌سازی عددی ترکیب اکسیدکننده و سوخت به ترتیب شامل هوای پیش‌گرم شده و متان خالص است. استوانه‌ای به طول ۳۰۰ میلی‌متر و شعاع ۷۵ میلی‌متر به‌عنوان محفظه احتراق کوره بوده و در ادامه آن از یک بخش نازل شکل، برای چرخش مجدد محصولات احتراق جهت رقیق‌سازی واکنش دهنده‌ها به طول ۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. در انتهای کوره نیز دودکشی به طول و شعاع به ترتیب ۱۵۰ و ۴۲/۵ میلی‌متر جهت هدایت محصولات احتراق به بیرون از کوره جانمایی شده است.

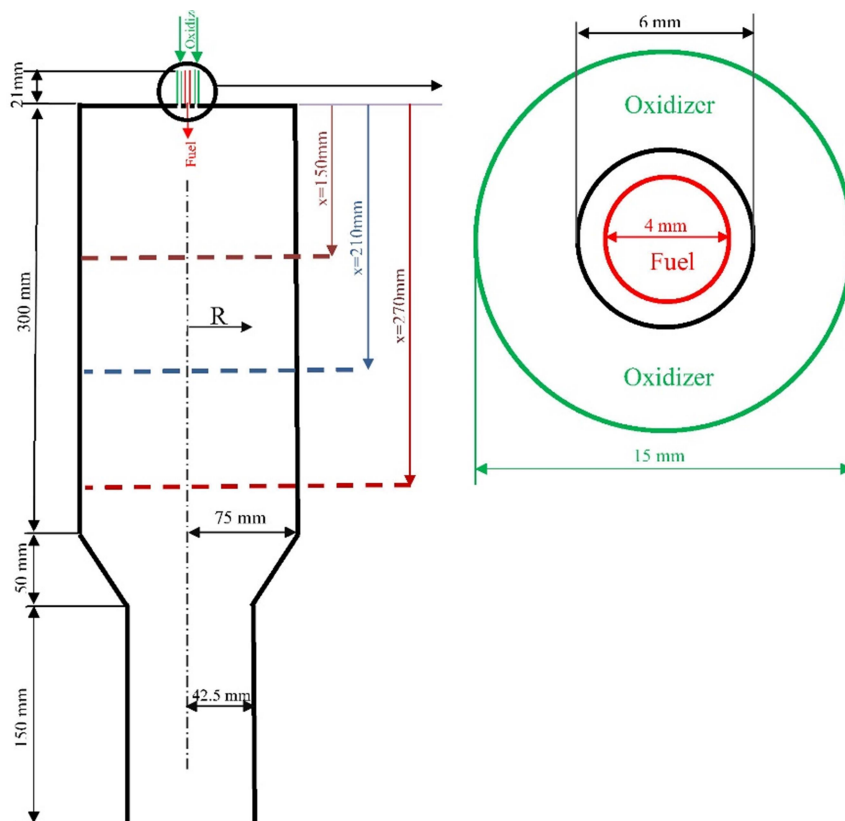


Figure 1- Combustion furnace geometry in the current study

شکل ۱- هندسه کوره احتراق مطالعه جاری

جهت مدل‌سازی CFD در تحقیق جاری از معادلات متوسط‌گیری شده ناویر استوکس (RANS) استفاده شده است. صورت جدید معادلات بقای جرم، بقای تکانه، بقای انرژی و بقای گونه‌ها با استفاده از روش متوسط‌گیری فاور [۱۷] بدین صورت است. اولین معادله، معادله بقای جرم است.

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

معادله دوم نیز مربوط به بقای تکانه بوده که به‌صورت رابطه (۲) خواهد بود.

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{u}_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial\bar{\rho}\tilde{u}_i}{\partial t} = \bar{R}_{M,i} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho}\tilde{u}_i''\tilde{u}_j'') - \frac{\partial\bar{p}}{\partial x_j} \quad (2)$$

معادله بقای گونه‌ها بدین ترتیب بازنویسی شده است.

$$\frac{\partial\bar{\rho}\tilde{Y}_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}[\bar{\rho}\tilde{Y}_k\tilde{u}_i] - \frac{\partial}{\partial x_i}[\bar{V}_{k,i}\tilde{Y}_k + \bar{\rho}\tilde{u}_i''\tilde{Y}_k''] - \bar{\omega}_k = 0 \quad (3)$$

در نهایت فرم جدید معادله بقای انرژی مطابق رابطه (۴) معرفی می‌شود.

$$\frac{\partial\bar{\rho}\tilde{h}_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{h}_s) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{q}_i + \bar{\rho}\tilde{u}_i''\tilde{h}_s'') = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \bar{\omega}_T + \bar{\tau}_{ij}\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_j} + \bar{Q} + \bar{S}_H \quad (4)$$

در این معادلات عبارات ρ , u , h و Y به ترتیب سرعت، چگالی، آنتالپی و کسر جرمی گونه هستند. همچنین عبارت P مربوط به پارامتر فشار و عبارت ω مربوط به میانگین سرعت واکنش است. ترم $\bar{\rho}\tilde{u}_i''\tilde{u}_j''$ متعلق به تنش رینولدز بوده و به کمک مدل‌های آشفتگی شبیه‌سازی می‌شود. عبارت نفوذ آشفتگی و شار گرمای آشفتگی نیز به کمک روابط (۵) و (۶) مدل‌سازی می‌شوند.

$$\bar{\rho}\tilde{u}_i''\tilde{Y}_k'' = -\frac{\mu_t}{Sc_{kt}}\frac{\partial\tilde{Y}_k}{\partial x_i} \quad (5)$$

$$\bar{\rho}\tilde{u}_i''\tilde{h}_s'' = -\frac{\mu_t}{Pr_t}\frac{\partial\tilde{h}_s}{\partial x_i} \quad (6)$$

که عبارات Sc_t و Pr_t به ترتیب عدد اشمیت آشفتگی و عدد پراوتل آشفتگی هستند.

نظر به پیچیدگی ساختار شعله و الزام به ایجاد سلول‌های محاسباتی بسیار کوچک جهت دستیابی به نتایج مطلوب، محاسبه نرخ واکنش‌ها هزینه محاسباتی بالایی دارد. به همین دلیل، روش‌های مختلفی برای محاسبه نرخ واکنش‌ها ارائه شده است. یکی از روش‌های مرسوم در این زمینه مدل‌سازی برهم‌کنش آشفتگی-شیمیایی بر پایه اختلاط آشفتگی است. روند محاسبات در روش مذکور بدین صورت است که برای محاسبه نرخ واکنش‌ها، تنها متغیرهای در مقیاس شبکه مانند غلظت گونه‌ها از محاسبات عددی به دست می‌آیند و برای تعیین ترم‌هایی که به ساختار شعله وابسته هستند و نیازمند به حل عددی در مقیاس زیر شبکه هستند، از طریق به‌کارگیری روابط و شبیه‌سازی اقدام می‌شود.

در مطالعات صورت گرفته توسط چن و همکاران [۱۸] و میناموتو و همکاران [۱۹، ۲۰]، با استفاده از شبیه‌سازی عددی مستقیم، تطبیق شرایط حالت احتراق مایلد با مدل‌های احتراقی بر پایه جریان پلاگ (مدل‌های احتراقی بر اساس اختلاط آشفتگی) و واکنشگاه اختلاط ایده‌آل گزارش شده است. همچنین، بررسی‌های مختلف در زمینه مدل‌سازی احتراق مایلد، اهمیت استفاده از سینتیک‌های شیمیایی جزئی را نشان می‌دهند [۲۱، ۲۲]؛ لذا بسیاری از تحقیقات صورت گرفته در فرآیندهای احتراق، مربوط به دو مدل احتراقی واکنشگاه نیمه مخلوط و مفهوم اتلاف گردابه (EDC) می‌باشند که در این مدل‌ها، امکان به‌کارگیری سینتیک‌های جزئی به همراه فرض واکنشگاه‌های PFR و یا PSR برای شبیه‌سازی احتراق وجود دارد. در مطالعه جاری در پیش‌بینی توزیع گونه‌ها و توزیع دما از مدل مفهوم اتلاف گردابه گرفته شده توسط ابراهیمی و همکاران [۲۳] استفاده شده است. در مدل مذکور به‌صورت همزمان، اصلاحاتی بر روی فرمول‌بندی نرخ واکنشی و همچنین ضرایب مدل مفهوم اتلاف گردابه نسبت به سایر مدل‌های مفهوم اتلاف گردابه [۵، ۲۴، ۲۵]، اعمال شده است. در این مدل، ضرایب EDC با روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌شود.

$$C_\gamma = \max(2.1317, \min\{5, 0.5\sqrt{Da(Re_t + 1)}\}), Re_t = \frac{k^2}{\nu\varepsilon}, \text{ and } Da = \frac{\tau_\eta}{\tau_c} \quad (7)$$

$$C_\tau = \min\left(0.4082, \frac{0.05774}{Da\sqrt{Re_t + 1}}\right) \quad (8)$$

که Re_t , Da , τ_η و τ_c به ترتیب نشان‌دهنده عدد رینولدز آشفتگی، عدد دامکولر، مقیاس زمانی اختلاط کولموگروف و مقیاس زمانی شیمیایی هستند.

معادله انتقال تشعشی با فرض حالت شبه پایای ترمودینامیکی، ضریب شکست ثابت محیط و محیط همگن جهت انتقال حرارت بدین صورت است [۲۶].

$$\frac{\partial \tau_v(S' \rightarrow S)}{\partial S'} I_{bv}(S) + \int_{S_w} \frac{\partial}{\partial S} \left[\frac{\partial \tau_v(S' \rightarrow S)}{\partial S'} \right] I_{bv}(S') dS' - \frac{\partial I_v(S, \varphi)}{\partial S} + I_{wv}(S_w, \varphi) \frac{\partial}{\partial S} \{ \tau(S' \rightarrow S) \} = 0 \quad (9)$$

گسیل محلی در عبارت اول در سمت چپ معادله فوق، میزان تشعشع از اشعه‌های موجود در امتداد خط دید در ترم دوم و میزان جذب محلی از گسیل سطح در ترم سوم معادله ظاهر گشته است. در این مطالعه، ترم چشمه حرارتی در معادله انرژی به‌عنوان ترم مؤثر در انتقال حرارت تشعشی است. بدین منظور از روش جهات گسسته (DO) جهت حل معادله انتقال تشعشی استفاده می‌شود.

مدل‌سازی کوره احتراق مایلد به کمک متن‌باز این‌فوم صورت گرفته است. به‌منظور پیش‌بینی صحیح توزیع گونه‌ها و توزیع دما از مکانیزم شیمیایی GRI 2.11 [27] با ۲۷۷ واکنش مختلف و ۴۹ گونه متعدد استفاده شده است. مطابق نتایج ارائه شده توسط کیم و همکاران [۲۸]، مکانیزم مذکور عملکرد قابل قبولی در زمینه شبیه‌سازی کوره احتراق مایلد را دارا است. ضمناً از الگوریتم پیمپل برای تفکیک میان فشار و سرعت استفاده شده که این الگوریتم ترکیبی از الگوریتم‌های سیمپل و پیزو است. تقریب مورد استفاده در گسسته‌سازی عبارات جابجایی از مرتبه دوم و به‌صورت رو به جلو بوده و در صورت رسیدن مقدار باقیمانده متغیرها در هر گام زمانی به مقدار پایین‌تر از 10^{-7} حل مذکور همگرا محسوب شده است. برای پارامتر دما نیز در بخش خروجی کوره در مدت زمان ۰/۵ ثانیه، چنانچه تغییرات دمایی زیر ۱ کلوین باشد، معیار همگرایی ارضا شده است. با توجه به ایجاد شرایط احتراق مایلد در تمامی نواحی کوره، دقت لازم جهت اعتبارسنجی نتایج موردنظر بوده است، بر این اساس به‌منظور حصول اطمینان از صحت نحوه شبیه‌سازی صورت گرفته، نتایج مدل‌سازی کوره مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات انجام شده توسط ربولا و همکاران [۱۶] در زمینه انتخاب مدل آشفته‌گی برای کوره احتراق مایلد نشان می‌دهد، دقت مدل دو معادله‌ای کی-ا‌پسیلون استاندارد در تقریب تنش‌های رینولدز قابل قبول است. بر این اساس در مطالعه جاری نیز، این مدل بکار گرفته شده است.

شرایط عملکردی

بررسی‌های صورت گرفته در مطالعه فعلی به دو بخش تقسیم می‌شود. در بخش نخست، داده‌های تجربی ربولا و همکاران [۱۶] با داده‌های به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی انجام شده جهت پیاده‌سازی اعتبارسنجی مقایسه می‌شود. در جدول ۱ شرایط مذکور شامل سرعت و دمای ورودی سوخت، سرعت و دمای ورودی اکسیدکننده و همچنین دمای دیواره کوره قابل مشاهده است.

جدول ۱- شرایط عملکردی کوره احتراق مایلد [۱۶] به‌منظور اعتبارسنجی

Thermal power (kW)	Oxidizer		Fuel		Wall
	Velocity (m/s)	Temperature (K)	Velocity (m/s)	Temperature (K)	Temperature (K)
10	102	773.2	24.4	293.2	900

در بخش دوم نتایج حاصل از بررسی شرایط عملکردی مختلف شامل توان حرارتی، نسبت هم ارزی و ترکیب اکسیدکننده و سوخت موردتوجه خواهد بود. مطابق توضیحات ارائه شده در مطالعه جاری، تمرکز بر روی شرایط احتراق مایلد معطوف شده است. تعاریف متفاوتی از شرایط دستیابی به این رژیم احتراقی ارائه شده است [۲۹-۳۱]. شرایط اساسی مذکور شامل کاهش غلظت اکسیژن در مخلوط احتراقی و دمای بالای محصولات احتراقی است. به‌صورت کلی در این رژیم، دمای مخلوط ورودی نسبت به دمای خود اشتعالی بیشتر بوده و اختلاف بین دمای بیشینه احتراق و دمای مخلوط ورودی کمتر از دمای خود

اشتعالی مخلوط است. شرایط هندسی کوره مورد مطالعه به گونه‌ای است که امکان بازچرخش محصولات احتراقی را ایجاد می‌کند که این موضوع دستیابی به شرایط رژیم احتراقی مایلد را تسهیل می‌کند. ایجاد شرایط لازم جهت دسترسی به احتراق مایلد، علاوه بر شرایط هندسی کوره، به شرایط عملکردی کوره نیز وابسته است. بر این اساس در جدول ۲ شرایط عملکردی در تحقیق فعلی که در آن امکان دستیابی به رژیم احتراق مایلد فراهم بوده، ارائه شده است.

جدول ۲- شرایط عملکردی در تحقیق جاری بر اساس توان حرارتی، نسبت هم ارزی و ترکیب سوخت

Table 2- Functional conditions in current research based on thermal power, equivalence ratio and fuel and oxidizer content

Case No.	Thermal Power (kW)	Fuel Mixture based on Mass Fraction	Oxidizer Mixture based on Mole Fraction	Equivalence Ratio (ϕ)
1-24	5	$Y_{H_2}=0.3$ and $Y_{CO}=0.7$	$X_{O_2}=0.21$ and $X_{N_2}=0.79$	0.1, 0.2, 0.4, and 0.6
		$Y_{H_2}=0.2$ and $Y_{CO}=0.8$		
		$Y_{H_2}=0.1$ and $Y_{CO}=0.9$		
		$Y_{H_2}=0.05$ and $Y_{CO}=0.95$		
		$Y_{H_2}=0.02$ and $Y_{CO}=0.98$		
25-48	16	$Y_{H_2}=0.01$ and $Y_{CO}=0.99$	$X_{O_2}=0.21$ and $X_{N_2}=0.79$	0.1, 0.2, 0.4, and 0.6
		$Y_{H_2}=0.3$ and $Y_{CO}=0.7$		
		$Y_{H_2}=0.2$ and $Y_{CO}=0.8$		
		$Y_{H_2}=0.1$ and $Y_{CO}=0.9$		
		$Y_{H_2}=0.05$ and $Y_{CO}=0.95$		
		$Y_{H_2}=0.02$ and $Y_{CO}=0.98$		
		$Y_{H_2}=0.01$ and $Y_{CO}=0.99$		

نتایج

اعتبارسنجی حلگر عددی

در این بخش، نتایج اعتبارسنجی حل عددی برای کوره احتراق غیر پیش آمیخته ارائه شده است. شکل ۲ مقادیر شعاعی پارامترهای دما و کسر حجمی خشک گونه‌های O_2 و CO_2 را در فواصل محوری ۱۵۰، ۲۱۰ و ۲۷۰ میلی‌متر برای کار تجربی ربولا و همکاران [۱۶] و مطالعه عددی فعلی نشان می‌دهد. مقایسه بین این نتایج نشان می‌دهد که مدل‌سازی جاری نتایج قابل قبولی در مقایسه با داده‌های تجربی دارد. میانگین خطای حل عددی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های تجربی برای پارامتر کسر حجمی خشک گونه‌های O_2 و CO_2 به ترتیب کمتر از ۸ و ۶ درصد و برای پارامتر دما کمتر از ۵ درصد است. لازم به ذکر است مطابق گزارش ارائه شده توسط مرجع [۱۶]، میانگین خطای ۵ درصد در اندازه‌گیری کسر حجمی خشک گونه‌ها به وسیله پروب‌های آزمایشگاهی و اندازه‌گیری دما به وسیله سنسورهای دما نیز وجود دارد.

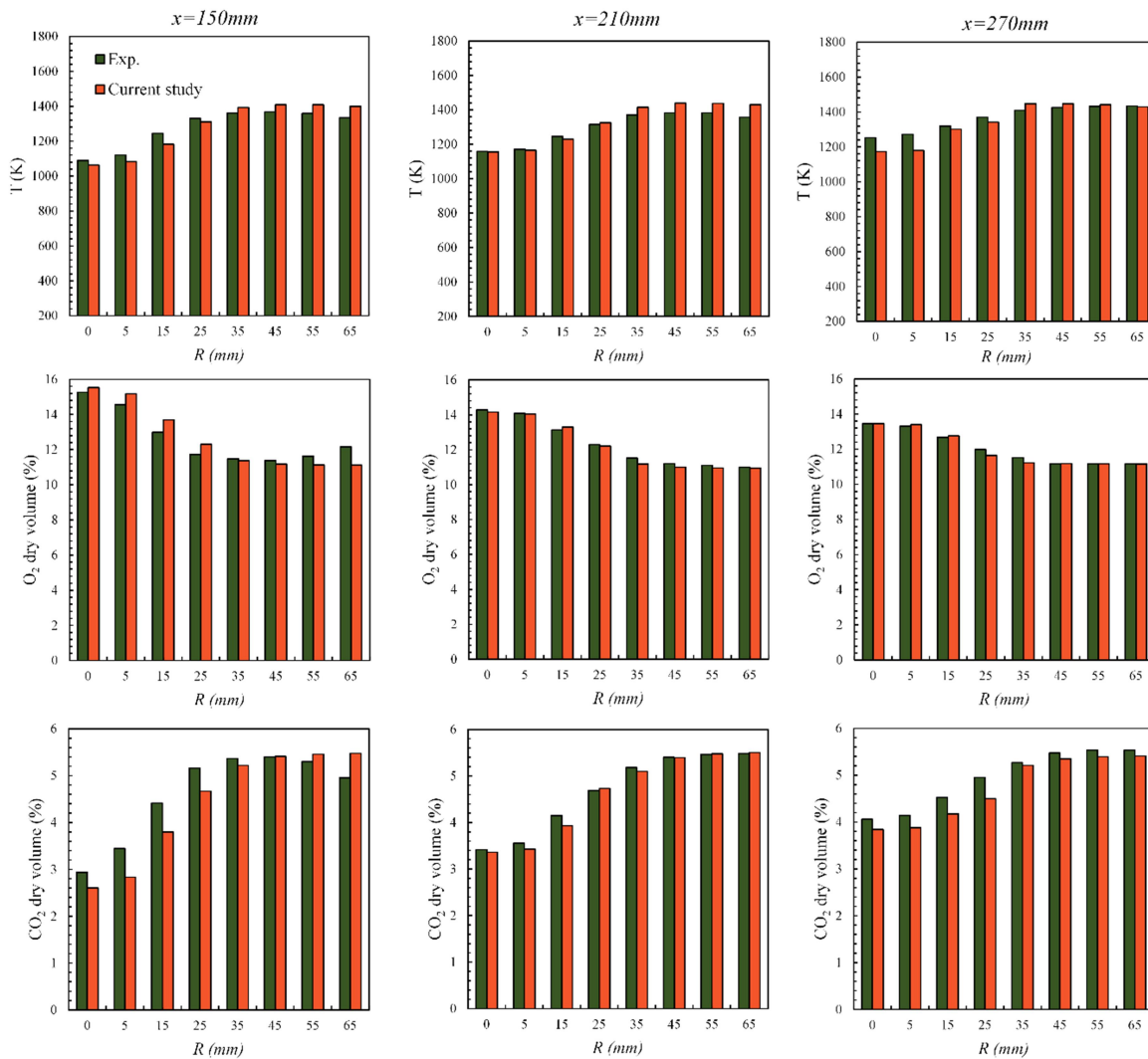


Figure 2- Radial magnitude of temperature and dry volume fraction of O_2 and CO_2 species at different intervals compared with experimental data of Rebola et al. [16]

شکل ۲- اعتبارسنجی مقادیر شعاعی دما و توزیع کسر حجمی خشک گونه‌های O_2 و CO_2 در فواصل محوری مختلف در مقایسه با داده‌های تجربی ربولا و همکاران [۱۶]

مطالعه پارامترهای عملکردی

در این قسمت نتایج مربوط به تأثیر پارامترهای عملکردی توان کوره، ترکیب سوخت و نسبت سوخت به هوا روی شرایط حرارتی و ساختار شعله گاز سنتز-هوا در رژیم‌های مایلد و دما بالا ارائه خواهند شد. با توجه به غیر پیش آمیخته بودن شعله تشکیل شده درون کوره باید توجه کرد که کمیت نسبت سوخت به هوا تعیین کننده دبی هوا و سوخت در ورودی کوره که از رابطه ۱۰ قابل محاسبه است.

$$\varphi = \frac{\dot{m}_{\text{fuel}} / \dot{m}_{\text{qir}}}{\left(\dot{m}_{\text{fuel}} / \dot{m}_{\text{qir}} \right)_{\text{stoichiometric}}} \quad (10)$$

در رابطه فوق \dot{m} بیانگر دبی جرمی و زیروندهای fuel و air به ترتیب بیانگر سوخت و هوای ورودی به کوره می‌باشند. همچنین کمیت بدون بعد نشان‌دهنده نسبت سوخت به هواست. توان کوره نیز مطابق با رابطه ۱۱ قابل محاسبه خواهد بود.

$$P = \dot{m}_{\text{fuel}} \times LHV \quad (11)$$

که در رابطه بالا، عبارت LHV مربوط به مقدار ارزش حرارتی پایین سوخت است. علاوه بر این، برای تعیین رژیم احتراقی تشکیل شده درون کوره از مطالعات پیشین دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است. از این رو با استفاده از کمیت‌های دمای بیشینه (T_{max})، دمای خود اشتعالی (T_{si})، دمای ورودی اکسیدکننده (T_{ox}) و نرخ آزادسازی حرارت درون کوره (HRR)، معیارهای تشکیل رژیم‌های مایلد و دما بالا درون کوره مطابق با جدول ۳ است.

جدول ۳- معیار شرایط احتراق مایلد و دما بالا بر اساس مطالعات پیشین
Table 3- The limitation for MILD and HTC combustion based on previous studies

Combustion atmosphere	Based on	Limitations	
		Temp.	HRR
MILD	de Joannon et al. [32, 33]	$(T_{\text{max}} - T_{\text{ox}}) < T_{\text{si}} < T_{\text{ox}}$	-
	Cheong et al. [34]	-	Presence of HRR > 0 zones and absence of HRR < 0 zones
	Luan et al. [31]	$(T_{\text{max}} - T_{\text{ox}}) < T_{\text{si}} < T_{\text{ox}}$	-
HTC	de Joannon et al. [32, 33]	$T_{\text{si}} < T_{\text{ox}}$ and $T_{\text{si}} < (T_{\text{max}} - T_{\text{ox}})$	-
	Cheong et al. [34]	-	Presence of HRR < 0 zones
	Luan et al. [31]	$T_{\text{si}} < T_{\text{ox}}$ and $T_{\text{si}} < (T_{\text{max}} - T_{\text{ox}})$	-

تأثیر پارامترهای عملکردی روی شرایط حرارتی

به‌منظور بررسی تأثیر شرایط عملکردی در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر روی شرایط حرارتی کوره از کانتور توزیع دمای درون کوره استفاده شده است. شکل ۳ نشان‌دهنده کانتور توزیع دما در مقادیر نسبت سوخت به هوای ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ در نسبت‌های کسر جرمی H_2/CO برابر با ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ و ۰/۳ برای کوره با توان ۵ کیلووات است. با توجه به شرایط جریان ورودی به کوره برحسب تشکیل رژیم مایلد یا رژیم دما بالا دو شکل متفاوت توزیع دما درون کوره مشاهده می‌شود. تحت رژیم مایلد، هسته مرکزی جریان که در مجاورت نازل‌های سوخت و هوا قرار دارد، دمایی نزدیک به دمای سوخت و هوای ورودی داشته و این هسته تا محدوده نزدیک به وسط کوره امتداد می‌یابد. پس از هسته مرکزی، واکنش‌دهنده‌های پیش‌گرم و رقیق‌سازی شده در نتیجه بازچرخش شدید محصولات احتراقی با توجه به شکل طراحی کوره در اثر خوداشتعالی محترق شده و واکنش‌های شیمیایی با توجه به سطح پایین اکسیژن موجود در مخلوط با نرخ پایینی در تمامی کوره به وقوع می‌پیوندند؛ تحت شرایط رژیم احتراقی دما بالا درون کوره، واکنش‌های شیمیایی با نرخی بالا در مجاورت نازل‌های هوا و سوخت ورودی اتفاق افتاده که منجر به تشکیل جبهه شعله‌ای محدود و ناحیه دما بالا با حجم کم در ورودی کوره می‌شود.

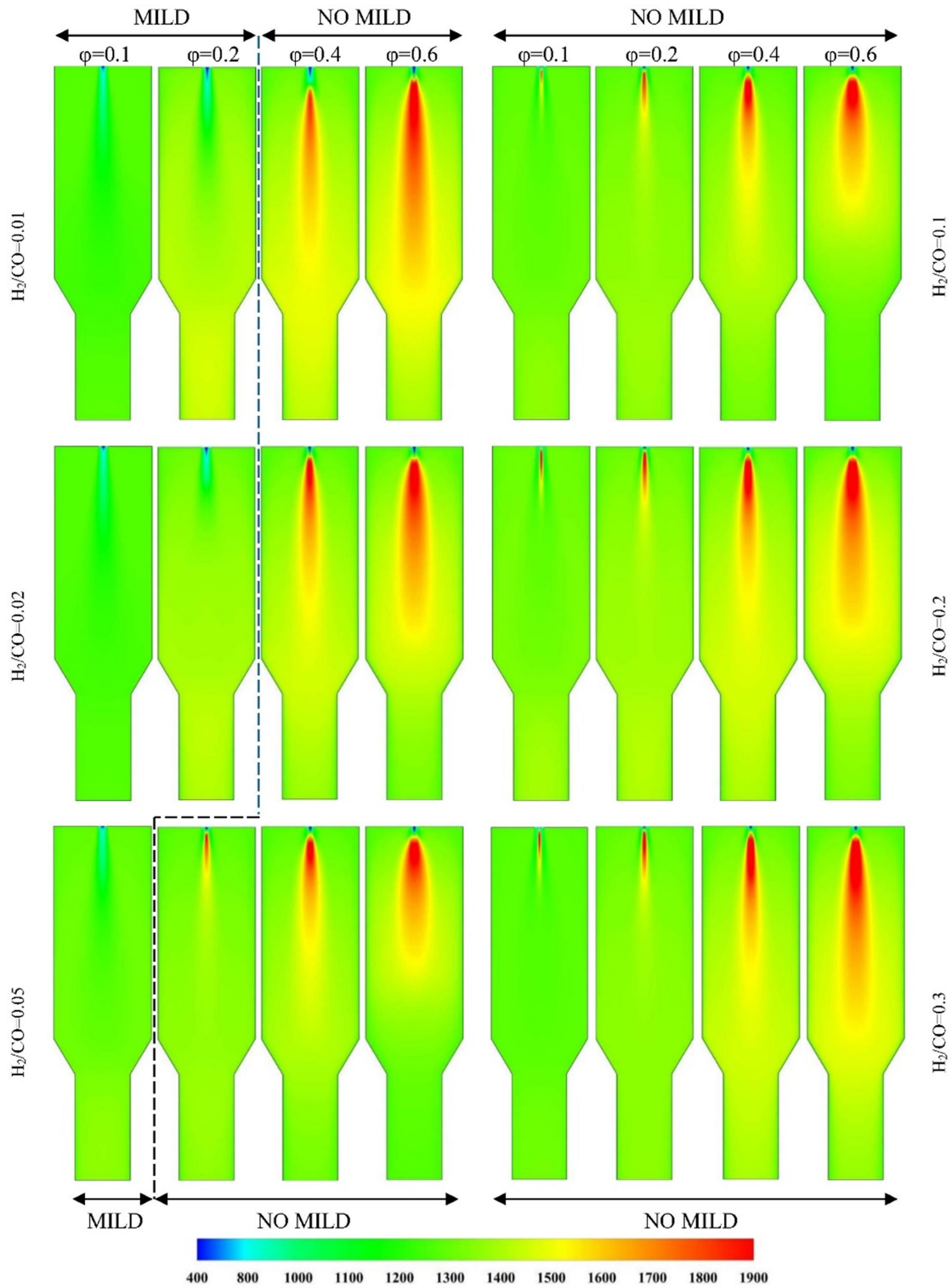


Figure 3- Temperature distribution inside the furnace at different mass fraction ratios of H_2/CO and different values of equivalence ratio for 5kW furnace

شکل ۳- کانتور توزیع دما درون کوره در نسبت‌های کسر جرمی مختلف H_2/CO و مقادیر مختلف نسبت هم ارزی برای کوره با توان ۵ کیلووات

مطابق با نتایج به دست آمده از کوره با توان ۵ کیلووات (شکل ۳) برای توزیع دما و نرخ آزادسازی حرارت و با توجه به معیارهای بیان شده برای تعیین رژیم احتراقی در پژوهش‌های بر اساس تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی (مطابق با جدول ۳)، در شرایط مقادیر ϕ بزرگتر از ۰/۲ (نسبت‌های سوخت به هوای ۰/۴ و ۰/۶) در هیچ یک از مقادیر H_2/CO رژیم احتراق مایلد تشکیل نشده است. علاوه بر این، در مقادیر ϕ های کوچکتر (مقادیر نسبت سوخت به هوای ۰/۱ و ۰/۲) نیز تشکیل رژیم مایلد وابسته به مقدار H_2/CO بوده و هیدروژن کمتر در ترکیب سوخت منجر به تسهیل در تشکیل رژیم مایلد می‌شود. در واقع می‌توان گفت، دستیابی به رژیم مایلد به صورت قابل توجهی به هر دو پارامتر نسبت سوخت به هوا و نسبت‌های هیدروژن به مونوکسید کربن موجود در سوخت وابسته است. علت این موضوع از دو جنبه فیزیکی و شیمیایی قابل ملاحظه است. از نظر شیمیایی این موضوع در بخش تحلیل ساختار شعله مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ اما از منظر فیزیکی علت آن است که ارزش حرارتی بسیار بالای H_2 نسبت به CO سبب می‌شود تا برای ثابت ماندن توان کوره در مقدار اکسندۀ ثابتی که به درون کوره تزریق می‌شود، سرعت سوخت به صورت قابل توجهی در ورودی کاهش یابد که این موضوع منجر به کاهش نرخ بازچرخش محصولات احتراقی درون کوره شده که نتیجه آن کاهش مقدار رقیق‌سازی مخلوط احتراقی از نظر سطح اکسیژن موجود در آن است. کاهش سطح رقیق‌سازی مخلوط نیز منجر به حذف یکی از عوامل اصلی و مؤثر در تشکیل رژیم مایلد شده و نتیجه آن تغییر رژیم احتراقی به رژیم معمولی یا دما بالا با توجه به دمای اکسندۀ ورودی است. از طرفی کاهش محدودۀ تشکیل رژیم مایلد با افزودن هیدروژن به سوخت (که برخلاف نتایج مطالعات پیشین [۱۱، ۳۵، ۳۶] مبنی بر تسهیل دستیابی به رژیم مایلد با افزودن H_2 به سوخت است) به علت ثابت نگه‌داشتن توان کوره است در مطالعه حاضر به‌عنوان یک پارامتر عملکردی کلیدی در شرایط کاری کوره است در حالی که در پژوهش‌های قبل، افزایش توان کوره با افزودن هیدروژن به ترکیب سوخت لحاظ نشده است.

شکل ۴ تغییرات دما در مقادیر مختلف نسبت کسر جرمی H_2/CO در چهار نسبت دبی سوخت به هوای ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ برای کوره با توان ۱۶ کیلووات را نشان می‌دهد. توزیع کلی دما درون کوره با تغییر در نسبت کسر جرمی H_2/CO و مقادیر مختلف ϕ مشابه با کوره با توان ۵ کیلووات بوده و از این حیث توزیع دما مستقل از توان کوره است. نکته قابل توجه با افزایش توان کوره، افزایش محدودۀ تشکیل رژیم مایلد در مقادیر H_2/CO و ϕ های مختلف است. علت این موضوع نیز از هر دو منظر اثرات شیمیایی و فیزیکی قابل بحث است. افزایش توان کوره با توجه به رابطه ارائه شده برای توان کوره (رابطه ۱۱)، با افزایش دبی سوخت ورودی به کوره انجام شده است. افزایش دبی سوخت در سطح مقطع ثابت ورودی به معنی افزایش سرعت ورودی سوخت است. افزایش سرعت ورودی از دو جنبه می‌تواند تشکیل احتراق مایلد را تسهیل کند؛ افزایش سرعت منجر به افزایش نرخ بازچرخش محصولات احتراقی به درون کوره با توجه به شکل هندسی آن شده و این موضوع افزایش سطح رقیق‌سازی مخلوط احتراقی به‌عنوان پارامتری کلیدی در دستیابی به احتراق مایلد به همراه دارد. از سوی دیگر افزایش سرعت ورودی منجر به افزایش تأخیر در اشتعال از طریق کاهش اختلاط سوخت و هوای ورودی شده و که خود عاملی برای افزایش نرخ پیش‌گرمایش واکنش دهنده‌ها و سطح رقیق‌سازی بالاتر در آن‌ها است. علاوه بر این، با مقایسه میان محدودۀ نسبت کسر جرمی H_2/CO و ϕ های مختلف منجر به تشکیل احتراق مایلد در کوره‌های با توان ۵ و ۱۶ کیلووات می‌توان گفت که با توجه به طراحی کوره احتراق دانشگاه لیسبون برای تشکیل احتراق مایلد در محدودۀ توان ۱۵/۶ کیلووات، فاصله گرفتن از مقدار توان طراحی شده منجر به محدود شدن ناحیه تشکیل رژیم احتراق مایلد می‌شود. کاهش قابل توجه توان منجر به انتقال رژیم احتراقی به رژیم‌های دما بالا یا معمولی با توجه به دمای ورودی مخلوط شده و افزایش قابل توجه توان نیز با افزایش خاموشی در شعله به علت افزایش تأخیر در اشتعال و عدم امکان تشکیل شعله درون فضای کوره طراحی شده اصلی می‌شود. بنابراین لازم است تا در صورت تغییر توان برحسب افزایش یا کاهش آن و در یک هندسه ثابت برخی شرایط عملکردی تغییر کند تا کوره بتواند عملکرد تقریباً ثابتی فراهم کند.

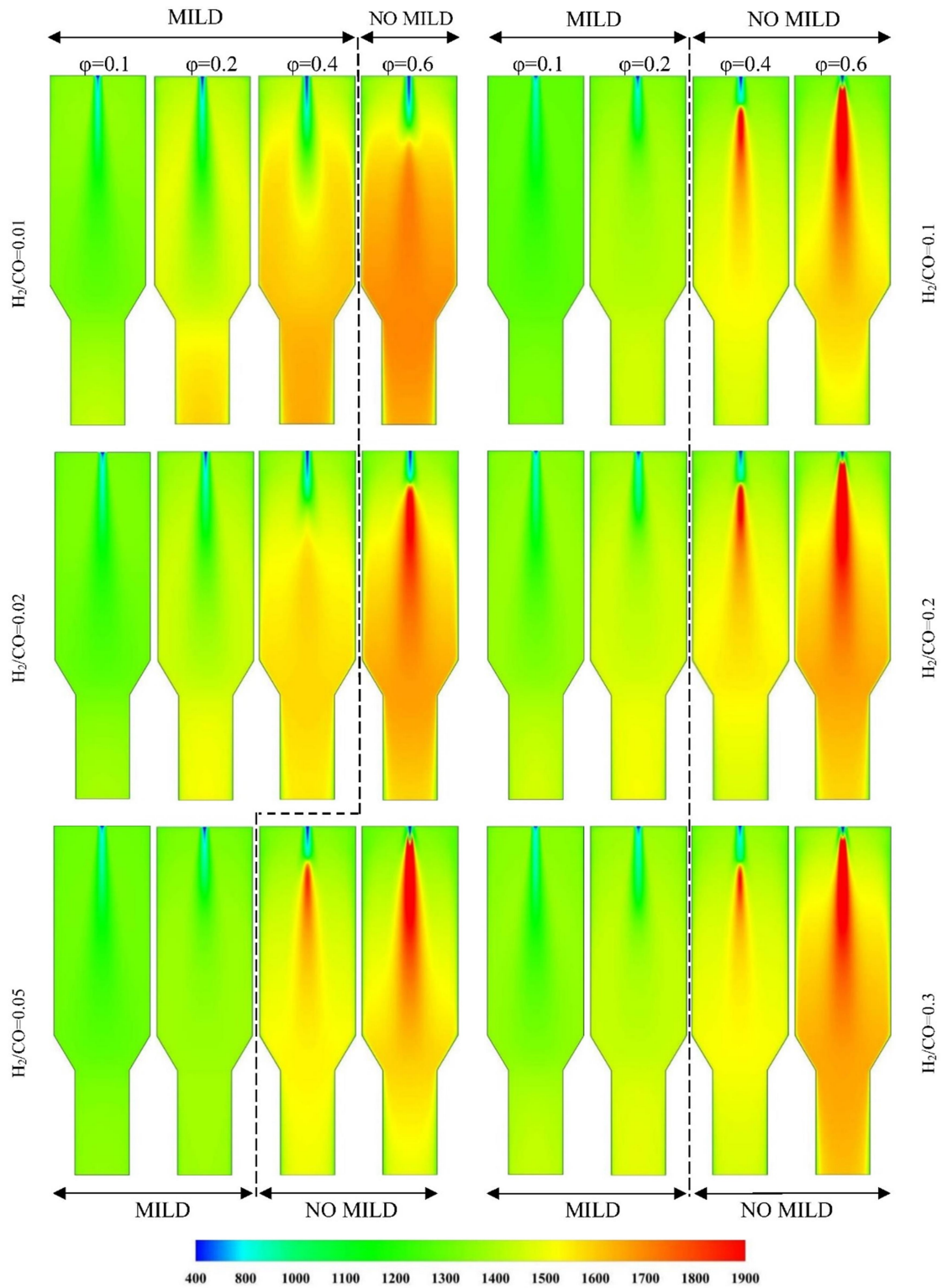


Figure 4- Temperature distribution inside the furnace at different mass fraction ratios of H_2/CO and different values of equivalence ratio for 16kW furnace

شکل ۴- کانتور توزیع دما درون کوره در نسبت‌های کسر جرمی مختلف H_2/CO و مقادیر مختلف نسبت هم ارزی برای کوره با توان ۱۶ کیلووات

تأثیر پارامترهای عملکردی بر ساختار شعله گاز سنتز

رادیکال هیدروکسیل به‌عنوان یکی از معیارهای اصلی در بررسی رفتار شعله و تأخیر در اشتعال در فرآیندهای احتراقی در مطالعات مختلف معرفی شده است. در مطالعه حاضر نیز به‌منظور بررسی ساختار شعله و تغییرات تأخیر در اشتعال توزیع رادیکال OH مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۵ نشان‌دهنده توزیع رادیکال هیدروکسیل در مقادیر سوخت به اکسنده ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ و مقادیر نسبت کسر جرمی هیدروژن به مونوکسید کربن ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ برای کوره با توان ۵ کیلووات است. در مقدار H_2/CO ثابت، افزایش ϕ منجر به افزایش غلظت رادیکال هیدروکسیل در ناحیه واکنشی شده و این مستقل از رژیم احتراقی است که علت آن مقدار سوخت بیشتر در مخلوط واکنشی است. به‌طور مشابه در یک ϕ ثابت با افزایش هیدروژن درون سوخت مقدار رادیکال هیدروکسیل تشکیل شده به‌صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد که این موضوع به علت افزایش هیدروژن موجود در ترکیب واکنش‌دهنده‌ها و در نتیجه تولید بیشتر رادیکال هیدروکسیل تشکیل شده از طریق واکنش‌های شیمیایی وابسته به وجود هیدروژن بیشتر در مخلوط است. مقایسه میان توزیع رادیکال هیدروکسیل بین رژیم‌های مایلد و دما بالا نیز از جنبه‌های مختلفی قابل مقایسه است. موضوع اول در مقایسه بین این دو رژیم مربوط به توزیع یکنواخت‌تر رادیکال هیدروکسیل درون سرتاسر کوره تحت رژیم مایلد نسبت به رژیم دما بالا است که این موضوع با نتایج حاصل شده در مطالعات پیشین [۱۱، ۳۶، ۳۷] در مقایسه میان این دو رژیم احتراقی انجام شده است، تطابق دارد. توزیع یکنواخت‌تر OH به‌طور کلی ناشی از کاهش نرخ واکنش‌ها به علت ایجاد ترکیب واکنشی با غلظت اکسیژن و هیدروژن کمتر تحت رژیم مایلد دانست. جنبه دوم مقایسه میان دو رژیم مربوط به تأخیر در اشتعال است. از توزیع کانتور رادیکال هیدروکسیل به‌وضوح مشخص است که فاصله محوری شروع واکنش‌ها در رژیم مایلد نسبت به رژیم دما بالا بسیار بیشتر است که این موضوع با افزایش سطح دمای پیش‌گرمایش و کاهش سطح غلظت اکسیژن مخلوط واکنشی به علت بازچرخش شدید گازهای داغ حاصل از احتراق همراه است. در ادامه نمودار فاصله اشتعال تحت شرایط عملکردی مختلف مورد بحث و بررسی بیشتر قرار خواهد گرفت. جنبه سوم در مقایسه بین دو رژیم نیز مربوط به مقدار بیشینه رادیکال هیدروکسیل تحت رژیم مایلد و دما بالا است. مقدار بیشینه رادیکال OH در رژیم دما بالا چندین مرتبه بزرگتر از احتراق مایلد بوده درحالی‌که حجم شعله تشکیل شده در رژیم دما بالا بسیار کوچکتر از رژیم مایلد خواهد بود.

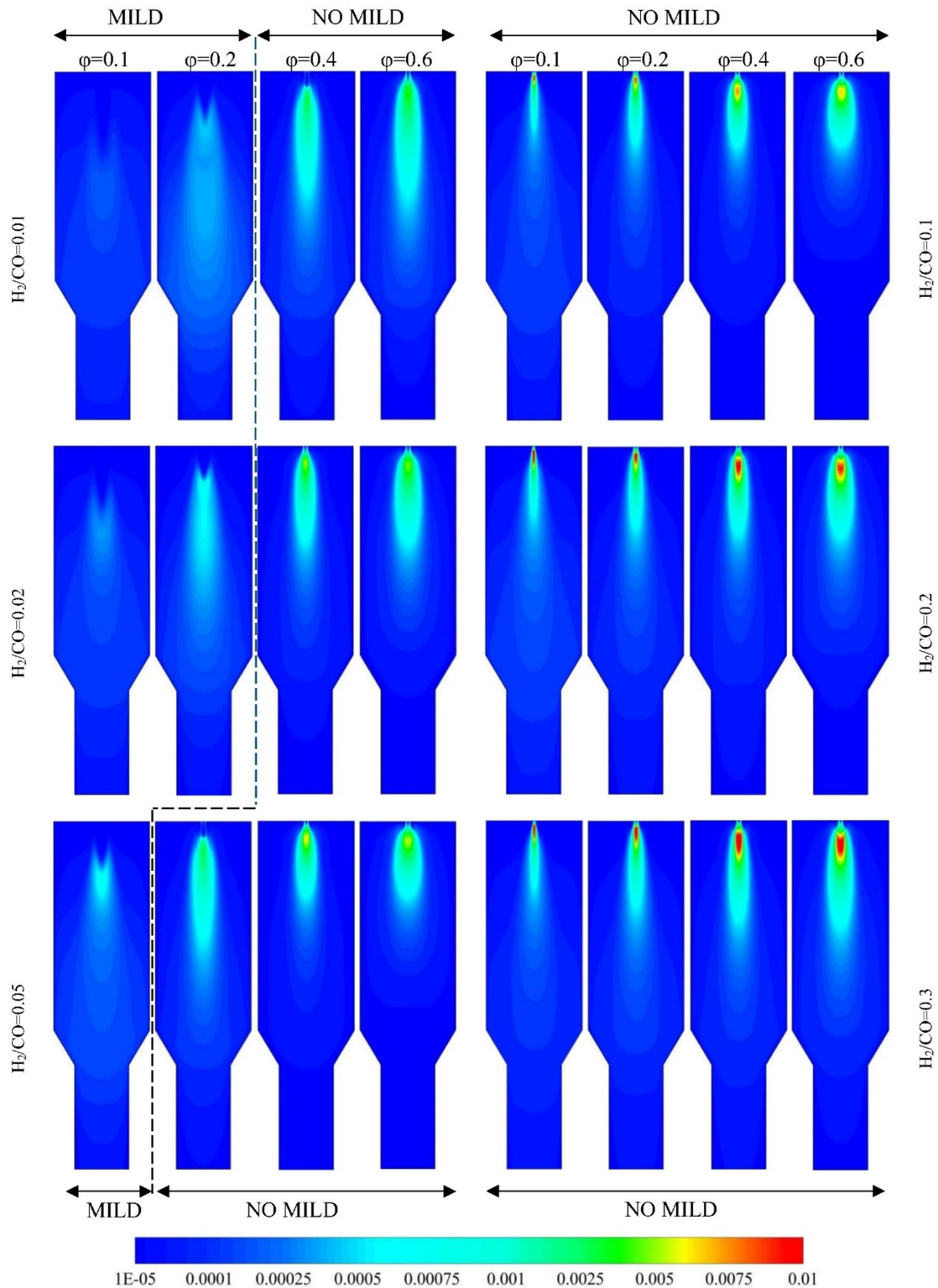


Figure 5- OH distribution at different mass fraction ratios of H_2/CO and different values of equivalence ratio for 5kW furnace
 شکل ۵- توزیع گونه هیدروکسیل برای نسبت‌های کسر جرمی مختلف H_2/CO و مقادیر مختلف نسبت هم ارزی برای کوره با توان ۵ کیلووات

شکل ۶ مربوط به توزیع رادیکال ہیدروکسیل برای کورہ با توان حرارتی ۱۶ کیلووات تحت شرایط گاز سنتز-ہوا با نسبت $0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2$ و 0.3 و در مقادیر سوخت به اکسیژن $0.1, 0.2, 0.4$ و 0.6 است. از نظر توزیع کلی و مقایسہ میان رژیمہای احتراقی مایلد و دما بالا، رفتار کلی رادیکال ہیدروکسیل با افزایش توان از ۵ بہ ۱۶ کیلووات تغییر نمی کند. در افزایش توان از ۵ بہ ۱۶ کیلووات، دبی سوخت افزایش پیدا کردہ کہ این موضوع بہ معنی افزایش سرعت جریان سوخت در شرایط کورہ با توان بالاتر است. افزایش سرعت سوخت ورودی منجر بہ تشکیل شعلہ در فاصلہ محوری طولانی تری نسبت بہ کورہ با توان ۵ کیلووات در شرایط عملکردی مشابہ می شود کہ این افزایش فاصلہ بہ منزله تأخیر در اشتعال و امکان بیشتر برای فراہم کردن شرایط لازم و کافی برای دستیابی بہ رژیم مایلد یعنی افزایش سطح رقیق سازی اکسیژن واکنش دہندہہا و افزایش بیشتر دمای مخلوط احتراقی تا رسیدن بہ دمای خوداشتعالی می شود. ہمین موضوع عاملی برای افزایش محدودہ تشکیل رژیم مایلد در کورہ با توان بالاتر است (ہمان طور کہ پیش تر ذکر شد، شرایط طراحی کورہ حاضر برای توان ۱۶ کیلووات است و برای داشتن رژیم مایلد در شرایط عملکردی مشابہ با توان کمتر لازم است ہندسہ کورہ اصلاح شود). جنبہ دیگر مقایسہ میان دو توان ۵ و ۱۶ کیلووات در ہر دو رژیم احتراقی مربوط بہ توزیع یکنواخت تر و در حجمی گستردہ تر در توانہای کورہ بالاتر است. علت این موضوع افزایش مقدار سوخت موجود در ترکیب واکنشی در حالت با توان بالاتر است. افزایش سوخت در توان بالاتر منجر بہ افزایش ہیدروژن موجود در ترکیب واکنش دہندہہا شدہ و این عاملی برای افزایش سطح رادیکال ہیدروکسیل تشکیل شدہ است کہ این موضوع علاوہ بر توزیع یکنواخت تر OH، حجم بالاتر شعلہ را نیز در پی خواہد داشت.

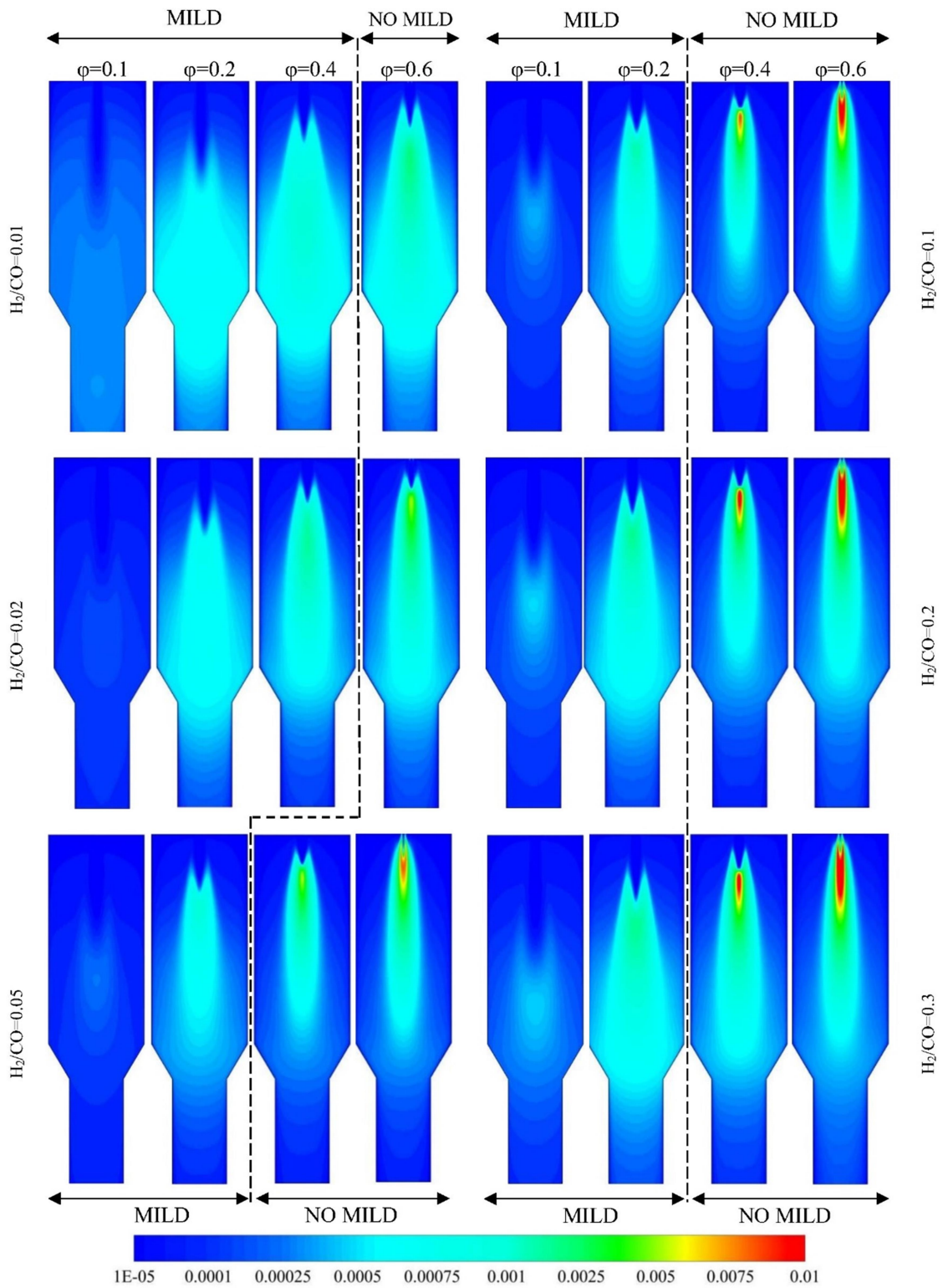


Figure 6- OH distribution at different mass fraction ratios of H₂/CO and different values of equivalence ratio for 16kW furnace

شکل ۶- توزیع گونه هیدروکسیل برای نسبت‌های کسر جرمی مختلف H₂/CO و مقادیر مختلف نسبت هم ارزی برای کوره با توان ۱۶ کیلووات

نتیجه گیری

در مطالعه حاضر تأثیر پارامترهای عملکردی توان کوره، نسبت سوخت به هوا و نسبت کسر جرمی هیدروژن به مونوکسید کربن با استفاده از شبیه‌سازی عددی کوره احتراق دانشگاه لیسبون پرتغال تحت دو رژیم مایلد و دما بالا روی عملکردی حرارتی کوره و ساختار شعله بررسی شده است. برای بررسی عملکرد حرارتی توزیع دما و برای بررسی ساختار شعله توزیع رادیکال هیدروکسیل به‌عنوان یکی از گونه‌های اصلی در بررسی شعله و تأخیر در اشتعال مورد مطالعه قرار گرفته است. محدوده پارامترهای عملکردی مطالعه حاضر شامل توان‌های حرارتی کوره ۵ و ۱۶ کیلووات، نسبت سوخت به هوای ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ و نسبت کسر جرمی‌های هیدروژن به مونوکسید کربن ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ است. مهم‌ترین نتایج حاصل از مطالعه حاضر عبارتند از:

- ۱- توزیع دما در رژیم مایلد یکنواخت‌تر از رژیم دما بالا بوده و مقدار بیشینه دما تحت رژیم مایلد به‌صورت قابل توجهی (بین ۵۰۰ تا ۸۰۰ کلوین) کمتر از رژیم دما بالا است. همچنین مقایسه کانتور هیدروکسیل نشان‌دهنده آن است که تشکیل رژیم مایلد مستلزم ایجاد تأخیر در اشتعال به‌منظور افزایش سطح رقیق‌سازی مخلوط واکنش‌دهنده‌ها است. نتایج بیان شده مستقل از دو پارامتر عملکردی دیگر یعنی نسبت کسر جرمی هیدروژن به مونوکسید کربن و نسبت دبی سوخت به هوا است.
- ۲- کاهش توان حرارتی از ۱۶ به ۵ کیلووات در نسبت دبی سوخت به هوا و نسبت کسر جرمی هیدروژن به مونوکسید کربن ثابت منجر به کاهش محدوده تشکیل رژیم احتراق مایلد می‌شود. علت این موضوع کاهش سرعت جریان سوخت و هوا بوده که منجر به کاهش نرخ بازچرخش محصولات احتراقی و کاهش تأخیر در احتراق است. این موضوع بدان معناست که برای تغییرات قابل توجه توان حرارتی کوره که می‌تواند ناشی از تغییر سوخت باشد لازم است هندسه کوره بازطراحی یا اصلاح شود.
- ۳- افزایش هیدروژن موجود در ترکیب سوخت همراه با انتقال از رژیم احتراق مایلد به رژیم دما بالا خواهد بود. علت این موضوع کاهش سرعت جریان سوخت ورودی برای ثابت نگه‌داشتن توان کوره به علت ارزش حرارتی بسیار بالاتر هیدروژن نسبت به مونوکسید کربن بوده که این موضوع با کاهش نرخ بازچرخش محصولات احتراقی و در نتیجه کاهش سطح رقیق‌سازی واکنش‌دهنده‌ها همراه خواهد بود.
- ۴- در نسبت‌های بالاتر سوخت به هوا نیز به علت افزایش کسر جرمی سوخت درون مخلوط واکنشی که منجر به کاهش تأخیر در اشتعال می‌شود، تشکیل رژیم احتراقی دما بالا نسبت به رژیم مایلد محتمل‌تر است.
- ۵- در جایگزینی سوخت یک سیستم احتراقی مایلد با سوخت سنتز باید توجه کرد که تحت شرایط جدید پارامتر عملکردی توان تقریباً ثابت نگهداشته شده و نسبت‌های دبی سوخت به هوا و نسبت کسر جرمی هیدروژن به مونوکسید کربن موجود در ساختار سوخت به گونه‌ای تنظیم شوند که انتقال از رژیم مایلد به دما بالا اتفاق نیفتد.

منابع

- [1] M. Hamdy, A. Abdelhalim, M. A. Haque, A. Abdelhaféz, and M. A. Nemitallah, "Flow, combustion and species fields of premixed CH₄/H₂/CO syngas oxy-flames on a swirl burner: Effects of syngas composition," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 68, pp. 1398-1411, 2024.
- [2] M. Chaos and F. L. Dryer, "Syngas combustion kinetics and applications," *Combustion Science and Technology*, vol. 180, no. 6, pp. 1053-1096, 2008.
- [3] F. Wang, C. Xiao, D. Zhang, X. Wen, H. Deng, and G. Chen, "The effect of CH₄ addition on high-H₂ syngas combustion characteristics under N₂/CO₂ dilution," *Journal of the Energy Institute*, vol. 114, no. 101600, 2024.
- [4] Z. Zhang *et al.*, "Computational study on the effect of gasification reaction on pulverized coal MILD combustion diluted by N₂ and CO₂," *Applied Thermal Engineering*, vol. 158, p. 113806, 2019.
- [5] A. Parente, M. R. Malik, F. Contino, A. Cuoci, and B. B. Dally, "Extension of the Eddy Dissipation Concept for turbulence/chemistry interactions to MILD combustion," *Fuel*, vol. 163, pp. 98-111, 2016.
- [6] A. Mardani and H. K. M. Mahalegi, "Hydrogen enrichment of methane and syngas for MILD combustion," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 18, pp. 9423-9437, 2019.

- [7] G. Khabbazian, J. Aminian, and R. H. Khoshkhou, "Experimental and numerical investigation of MILD combustion in a pilot-scale water heater," *Energy*, vol. 239, p. 121888, 2022.
- [8] S. Xu *et al.*, "Effects of wall temperature on methane MILD combustion and heat transfer behaviors with non-preheated air," *Applied Thermal Engineering*, vol. 174, p. 115282, 2020.
- [9] A. Shaker, E. E. Fordoei, and F. A. Boyaghchi, "Study of NO emission from CH₄-air, oxygen-enriched, and oxy-CH₄ combustion under HTC and MILD regimes: Impact of wall thermal condition in different oxidant temperature and dilution level," *Energy*, vol. 277, p. 127683, 2023.
- [10] Y. Liu, C. Zou, J. Cheng, H. Jia, and C. Zheng, "Experimental and numerical study of the effect of CO₂ on the ignition delay times of methane under different pressures and temperatures," *Energy & fuels*, vol. 32, no. 10, pp. 10999-11009, 2018.
- [11] E. E. Fordoei, K. Mazaheri, and A. Mohammadpour, "Effects of hydrogen addition to methane on the thermal and ignition delay characteristics of fuel-air, oxygen-enriched and oxy-fuel MILD combustion," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 68, pp. 34002-34017, 2021.
- [12] G. Sorrentino, P. Sabia, P. Bozza, R. Ragucci, and M. de Joannon, "Impact of external operating parameters on the performance of a cyclonic burner with high level of internal recirculation under MILD combustion conditions," *Energy*, vol. 137, pp. 1167-1174, 2017.
- [13] A. Shaker, S. A. Hashemi, and E. E. Fordoei, "Numerical study of the O₂/CO₂, O₂/CO₂/N₂, and O₂/N₂-syngas MILD combustion: Effects of oxidant temperature, O₂ mole fraction, and fuel blends," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 79, pp. 30909-30929, 2023.
- [14] G. Shi, P. Li, F. Hu, and Z. Liu, "NO mechanisms of syngas MILD combustion diluted with N₂, CO₂, and H₂O," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 37, pp. 16649-16664, 2022.
- [15] M. Mehregan and M. Moghiman, "A numerical investigation of preheated diluted oxidizer influence on NO_x emission of biogas flameless combustion using Taguchi approach," *Fuel*, vol. 227, pp. 1-5, 2018.
- [16] A. Rebola, M. Costa, and P. J. Coelho, "Experimental evaluation of the performance of a flameless combustor," *Applied thermal engineering*, vol. 50, no. 1, pp. 805-815, 2013.
- [17] T. Poinso and D. Veynante, *Theoretical and numerical combustion*. RT Edwards, Inc., 2005.
- [18] Z. Chen, V. Reddy, S. Ruan, N. Doan, W. L. Roberts, and N. Swaminathan, "Simulation of MILD combustion using Perfectly Stirred Reactor model," *Proceedings of the combustion institute*, vol. 36, no. 3, pp. 4279-4286, 2017.
- [19] Y. Minamoto and N. Swaminathan, "Scalar gradient behaviour in MILD combustion," *Combustion and flame*, vol. 161, no. 4, pp. 1063-1075, 2014.
- [20] Y. Minamoto, N. Swaminathan, R. Cant, and T. Leung, "Reaction zones and their structure in MILD combustion," *Combustion Science and Technology*, vol. 186, no. 8, pp. 1075-1096, 2014.
- [21] J. Aminian, C. Galletti, S. Shahhosseini, and L. Tognotti, "Numerical investigation of a MILD combustion burner: analysis of mixing field, chemical kinetics and turbulence-chemistry interaction," *Flow, turbulence and combustion*, vol. 88, pp. 597-623, 2012.
- [22] A. Parente, C. Galletti, and L. Tognotti, "Effect of the combustion model and kinetic mechanism on the MILD combustion in an industrial burner fed with hydrogen enriched fuels," *International journal of hydrogen energy*, vol. 33, no. 24, pp. 7553-7564, 2008.
- [23] E. E. Fordoei, K. Mazaheri, and A. Mohammadpour, "Numerical study on the heat transfer characteristics, flame structure, and pollutants emission in the MILD methane-air, oxygen-enriched and oxy-methane combustion," *Energy*, vol. 218, p. 119524, 2021.
- [24] B. F. Magnussen, "The eddy dissipation concept: A bridge between science and technology," in *ECCOMAS thematic conference on computational combustion*, 2005, vol. 21: Libson, Portugal, p. 24.
- [25] M. T. Lewandowski and I. S. Ertesvåg, "Analysis of the Eddy Dissipation Concept formulation for MILD combustion modelling," *Fuel*, vol. 224, pp. 687-700, 2018.
- [26] H.-Y. Shih, "Computed extinction limits and flame structures of H₂/O₂ counterflow diffusion flames with CO₂ dilution," *International journal of hydrogen energy*, vol. 34, no. 9, pp. 4005-4013, 2009.
- [27] R. K. H. C.T. Bowmann, D.F. Davidson, W.C. Gardiner, V. Lissianski, G.P. Smith, D.M. Golden, M. Franklach, M. Goldenberg, "GRI-Mech 2.11," *Available from: http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/ [accessed 28.3.2020 2020]*, 1995.
- [28] S. H. Kim, K. Y. Huh, and B. Dally, "Conditional moment closure modeling of turbulent nonpremixed combustion in diluted hot coflow," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 30, no. 1, pp. 751-757, 2005.
- [29] A. Cavaliere and M. de Joannon, "Mild combustion," *Progress in Energy and Combustion science*, vol. 30, no. 4, pp. 329-366, 2004.
- [30] H. Zhou, T. A. Ring, and J. C. Sutherland, "Additional criteria for MILD coal combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 38, no. 3, pp. 4233-4240, 2021.
- [31] C. Luan, S. Xu, B. Shi, Y. Tu, H. Liu, P. Li, and Z. Liu, "Re-recognition of the MILD combustion regime by initial conditions of T in and X O₂ for methane in a nonadiabatic well-stirred reactor," *Energy & fuels*, vol. 34, no. 2, pp. 2391-2404, 2020.
- [32] M. de Joannon, G. Sorrentino, and A. Cavaliere, "MILD combustion in diffusion-controlled regimes of hot diluted fuel," *Combustion and Flame*, vol. 159, no. 5, pp. 1832-1839, 2012.

- [33] M. De Joannon, P. Sabia, G. Cozzolino, G. Sorrentino, and A. Cavaliere, "Pyrolytic and oxidative structures in hot oxidant diluted oxidant (HODO) MILD combustion," *Combustion science and technology*, vol. 184, no. 7-8, pp. 1207-1218, 2012.
- [34] K.-P. Cheong, G. Wang, J. Si, and J. Mi, "Nonpremixed MILD combustion in a laboratory-scale cylindrical furnace: Occurrence and identification," *Energy*, vol. 216, p. 119295, 2021.
- [35] M. Huang, H. Deng, Y. Liu, B. Zhang, S. Cheng, X. Zhang, and F. Zhang, "Effect of fuel type on the MILD combustion of syngas," *Fuel*, vol. 281, p. 118509, 2020.
- [36] Y. Bao, Q. Yu, H. Xie, Q. Qin, and Y. Zhao, "Effect of H₂ and CO in syngas on oxy-MILD combustion," *Applied Energy*, vol. 352, p. 122025, 2023.
- [37] E. E. Fordoei and F. A. Boyaghchi, "NO emission characteristics for the HTC and MILD combustion regimes with N₂, N₂/CO₂ and CO₂ diluents: effect of H₂ addition to CH₄," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 92, pp. 36185-36210, 2023.

English Abstract

The effects of thermal power, fuel to air ratio, and syngas composition on thermal conditions and flame structure under MILD and HTC regimes

Ahmad Shaker¹, Seyed Abdolmahdi Hashemi^{2*}, Esmail Ebrahimi³

1- Department of Mechanical Engineering, Kashan University, Isfahan, Iran, Ahmad.Shaker@kashanu.ac.ir

2- Department of Mechanical Engineering, Kashan University, Isfahan, Iran, hashemi@kashanu.ac.ir

3- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran, ebrahimifordoei@tafreshu.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2024/07/24, Received in revised form: 2024/09/20, Accepted: 2024/09/21)

The present research aims to evaluate the effects of operational parameters including power, equivalence ratio, and syngas composition on thermal conditions and flame structure under MILD and HTC regimes. The simulation of the combustion furnace of the University of Lisbon has been implemented by using the standard k- ϵ turbulence model and the modified EDC model. The investigated parameters consist the furnace powers of 5 and 16 kW, equivalence ratios of 0.1, 0.2, 0.4, and 0.6, and the H₂/CO mass fraction ratio of 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, and 0.3. The results illustrate under MILD regime, the temperature distribution was more uniform than HTC regime, and achieving MILD regime requires ignition delay time to reach a significant level of mixture dilution. Also, the power enhancement facilitates the formation of MILD regime, while the increase in H₂ content in fuel blend at specified of furnace power leads to the transfer to HTC regime due to the decrease in the velocity of fuel flow and as a result the reduction in the recirculation rate of combustion products. According to the obtained results, if there is a significant change in the investigated operational parameters, essential modification of the furnace design to achieve MILD regime should be desired.

Keywords: MILD combustion, HTC, Temperature distribution, Syngas combustion, Flame structure.