

بررسی عددی تأثیر پارامترهای هندسی نازل‌های ورودی بر عملکرد احتراق بدون شعله گاز طبیعی و میزان انتشار NO_x

سعید حیدری ده‌چشمه^۱ و مجید سبزی‌پوشانی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۲۵ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۲۲	احتراق بدون شعله، روشی پیش‌رو برای افزایش راندمان احتراق و نیز کاهش تولید آلاینده است. از این رو بررسی خصوصیات احتراق بدون شعله در کوره‌های صنعتی، نیاز به مطالعه بیشتر دارد. هدف از این مطالعه، بررسی عددی تأثیر پارامترهای هندسی نازل‌های ورودی بر عملکرد احتراق بدون شعله در یک کوره نیمه‌صنعتی است. این پارامترها شامل فاصله نازل‌های پاشش سوخت و هوا و تعداد نازل ورودی سوخت است. در این شبیه‌سازی، از یک محفظه احتراق نیمه‌صنعتی استفاده شده که در صنعت ذوب آهن کاربرد دارد. مدل‌های k-E استاندارد و مفهوم اتلاف گردابه‌ای به ترتیب برای مدل‌سازی آشفستگی و احتراق اعمال و مدل WSGGM برای محاسبه ضرایب جذب و گسیل تابش استفاده شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی اولیه با داده‌های تجربی مربوط به توزیع دما و سرعت در مقاطع مختلف محفظه، سازگاری مطلوبی را نشان می‌دهد. همچنین صحت مدل تابشی با بررسی حالات بدون اعمال مدل تابشی، مدل DO و مدل P1 انجام و بر اساس نتایج مدل P1 انتخاب شده است. نتایج نشان می‌دهند تغییر فاصله نازل‌های سوخت و اکسیدکننده بیشتر در ناحیه بالادست محفظه احتراق تأثیرگذار است و با فاصله گرفتن نازل سوخت از مرکز محفظه، تأثیر محصولات احتراق بازگشتی در ناحیه واکنش شدت گرفته، دمای اوج محفظه کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد پاشنده‌ها سوخت، گرادیان دمای بیشتری در محفظه ایجاد و احتراق از حالت بدون شعله به سمت شعله ناپایدار پیش می‌رود. افزایش فاصله نازل‌ها در تعداد نازل ورودی سوخت کمتر دسترسی به حالت احتراق بدون شعله را در کوره‌های صنعتی بهبود بخشیده، میزان انتشار اکسید نیتروژن را کاهش می‌دهد.
واژگان کلیدی: احتراق بدون شعله، نرخ بازچرخش، فاصله نازل‌ها، تعداد نازل سوخت، NO _x	

۱- مقدمه

بسیاری از پژوهشگران و طراحان سیستم‌های احتراق قرار گیرد [۱]. احتراق سوخت‌های فسیلی منجر به تولید آلاینده‌های قابل ملاحظه و در نهایت، گرم شدن زمین به دلیل تشکیل عناصری از قبیل CO، NO_x و CO₂ می‌شود [۲]. NO در فرایند احتراق، از ترکیب نیتروژن و اکسیژن هوا در درجه حرارت بالا تشکیل و پس از ورود به هوا به سرعت به NO₂ تبدیل می‌شود. یکی از مهم‌ترین

امروزه در حدود نود درصد انرژی مصرفی جهان از طریق احتراق سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود. نیاز فزاینده جهان به انرژی، محدود بودن و کاهش سریع منابع سوخت‌های فسیلی و مشکلات زیست‌محیطی این سوخت‌ها موجب شده است که طراحی وسایل احتراق با بازده بالا از یک سو و تولید کم آلاینده از سوی دیگر، مورد توجه

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: spooshan@kashanu.ac.ir

۱. دانشجوی دوره دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

شعله، نرخ بازچرخش داخلی محصولات احتراق^۵ درون محفظه است که در توزیع یکنواخت ناحیه واکنش و نیز کاهش دمای اوج احتراق بسیار مؤثر است. بازچرخش محصولات از یک سو باعث افزایش دمای واکنش‌دهنده‌ها به دمای بالاتر از دمای خوداشتعالی می‌شود و از سوی دیگر، مخلوط واکنش‌دهنده‌ها را قبل از ورود به ناحیه واکنش رقیق می‌کند [۶].

در جریان‌های واکنشی به دلیل بالا بودن دمای گازهای حاصل از احتراق، انتقال حرارت تابشی از اهمیت زیادی برخوردار است. از این رو در بحث شبیه‌سازی عددی مسائل احتراق، باید انتخاب مدل مناسب برای مدل‌سازی تابشی با دقت صورت گیرد. دهقان و همکارانش [۹] تأثیرات پارامترهای تشعشی روی عدد ناسلت و پروفیل دمای بدون بعد را بررسی کردند و نشان دادند که تشعشع حرارتی باعث افزایش میزان انتقال حرارت خواهد شد. دو جزء واکنش بسیار مهم که به علت ضرایب جذب و گسیل بالا سهم عمده ای در انتقال حرارت تابشی دارند، CO₂ و H₂O هستند. نوع مدل تابشی مورد استفاده و نحوه محاسبه ضرایب جذب و گسیل، از مهم‌ترین عوامل در پیش‌بینی صحیح انتقال حرارت تابشی است. محمدشکیل و همکارانش [۱۰] مدل‌های مختلف تشعشی را همراه مکانیزم‌های متفاوت برای تعیین مؤثرترین مدل تشعشی برای مدل‌سازی عددی احتراق متان-اکسیژن در محفظه احتراق یک توربین گاز بررسی کردند. آن‌ها دریافتند مدل WSGGM پیشنهادی توسط بردبار [۱۱] بهترین نتایج را در پیش‌بینی دمای محفظه احتراق دارد. سیلوا [۱۲] نیز با استفاده از مدل WSGGM به بررسی آثار تشعشع در احتراق متان پرداخت که از نتایج این تحقیق می‌توان به اهمیت بسیار زیاد تشعشع در دمای محفظه و اهمیت کمتر بر میزان غلظت اجزای واکنش اشاره کرد. نقش پارامترهای هندسی محفظه در خصوصیات جریان و احتراق در رژیم احتراق بدون شعله بسیار حائز اهمیت است. صباغ و رهبر [۱۳] با بررسی سه شکل هندسی برای دهانه فلر شامل شکل‌های استوانه‌ای، مخروط باز و مخروط بسته، به این نتیجه رسیدند که هندسه مخروطی با دهانه باز نازل هوا شرایطی مطلوب‌تر برای احتراق فراهم می‌کند. یائوچی و همکارانش [۱۴] به

مکانیزم‌ها در بین مسیرهای اصلی تشکیل NOx، مکانیزم NO گرمایی است. این مکانیزم برای اولین بار توسط زلدوویچ مطرح شد [۳]. دما و غلظت بالای اکسیژن، از عوامل مهم در این مکانیزم بوده، تقریباً در بیشتر فرایندهای احتراقی دخیل هستند. این مکانیزم توسط سه واکنش اساسی زیر، با عنوان مکانیزم زلدوویچ توسعه‌یافته بیان می‌شود:



این واکنش‌ها به‌عنوان واکنش‌های تشکیل NO حرارتی نیز نامیده می‌شوند. تشکیل اکسید نیتروژن از طریق مولکول نیتروژن، نیازمند شکسته شدن پیوند قوی بین اتم‌های نیتروژن است و همین امر، موجب وابستگی شدید این مکانیزم به دما می‌گردد [۴]. از این رو اگر روشی، موجب کاهش دمای شعله شود، عاملی مؤثر در کاهش تشکیل NOx است.

احتراق بدون شعله^۱ یکی از فناوری‌های مهم در زمینه احتراق است که برای افزایش راندمان احتراق و نیز کاهش آلاینده‌ها گام مؤثری برداشته است. نام‌گذاری بدون شعله بدین دلیل است که شعله حاصل از احتراق بدون شعله در مقایسه با شعله‌های معمولی، مشخصه دیداری و درخشندگی واضحی ندارد و شعله فقط تحت شرایط خاص قابل مشاهده است. این نوع احتراق با نام‌های دیگری چون احتراق بی‌رنگ^۲، احتراق آرام^۳ و احتراق با هوای دما بالا^۴ نیز شناخته می‌شود [۵ و ۶]. منطقه واکنش برای یک رژیم احتراق بدون شعله ایدئال همگن و یکنواخت در کل فضای محفظه است، به طوری که واکنش‌دهنده‌ها (اکسیدکننده و سوخت) به‌خوبی رقیق شده، از این رو نرخ واکنش‌های شیمیایی در مقایسه با احتراق‌های معمولی پایین‌تر است [۷]. از مهم‌ترین ویژگی‌های احتراق بدون شعله، توزیع دمای یکنواخت با حداقل گرادیان دماست و از آنجا که دمای اوج احتراق در مقایسه با شعله‌های معمولی پایین‌تر است، میزان تولید آلاینده‌ها به‌طور محسوس کاهش می‌یابد [۸]. یکی از مهم‌ترین پارامترها در ایجاد احتراق بدون

4. HiTAC

5. Internal Recirculation Rate

1. Flameless Combustion

2. Colorless Combustion

3. MILD Combustion

صنعتی، نیاز به مطالعه بیشتر و کامل تر دارد. در این مطالعه شبیه سازی احتراق بدون شعله در یک کوره نیمه صنعتی انجام شده است. برای رسیدن به یک حالت بهینه در عملکرد احتراق بدون شعله، پارامترهای هندسی مربوط به نازل های ورودی سوخت و اکسیدکننده به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت و تأثیر آن بر ویژگی های جریان، احتراق و نیز میزان انتشار اکسید نیتروژن در محفظه احتراق نیمه صنعتی ارزیابی گردید.

۲- روش عددی

۲-۱- معادلات حاکم

مدل سازی احتراق، شامل حل جریانات آشفته، انتقال حرارت، انتقال جزء واکنش های شیمیایی و واکنش های شیمیایی می شود و استفاده از روش های متوسط گیری رینولدز همراه با یک مدل توربولانسی مناسب در آن معمول است. معادلات اضافی، نظیر انتقال تابش یا مدل های احتراقی خاص نیز در صورت لزوم، مورد استفاده قرار می گیرد.

معادله پیوستگی در فاز گازی به صورت رابطه (۴) است [۲۱]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (4)$$

در این رابطه، ρ چگالی و \vec{V} بردار سرعت است. متوسط رینولدز معادله مومنتوم در فاز گازی توسط رابطه (۵) داده می شود [۲۱]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \nabla \cdot ((\mu + \mu_t) \nabla \vec{V}) + \vec{F} \quad (5)$$

که μ و μ_t به ترتیب ویسکوزیته دینامیکی و ویسکوزیته آشفته و \vec{F} بردار نیروهای حجمی است. انتقال حرارت طبق معادله بقای انرژی که در رابطه (۶) نشان داده شده، محاسبه می شود [۲۱]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} E) = \nabla \cdot ((K + K_t) \nabla T) + \nabla \cdot (\tau \vec{V}) - \nabla \cdot (P \vec{V}) + S_r + S_h \quad (6)$$

در این رابطه، E انرژی کل، K و K_t به ترتیب ضریب هدایت حرارتی و ضریب هدایت آشفته، τ تانسور تنش، S_r چشمه حرارتی تابشی و S_h چشمه انرژی حاصل از واکنش است. در بسیاری از فرایندهای احتراق، نه تنها تابش مکانیزم غالب انتقال انرژی است، بلکه یکی از مشکل ترین مسائل موجود در احتراق است. درستی محاسبات تابشی، به ترکیبی از

بررسی تأثیر شکل محفظه بر خصوصیات احتراق بدون شعله پرداختند. آن ها با تغییر زاویه بین دیواره های جانبی و عرضی محفظه دریافتند که با افزایش این زاویه و تبدیل شکل محفظه به حالت واگرا، بازچرخش قوی تر محصولات احتراق، گرادیان دمایی کمتر و منطقه واکنش وسیع تری برای دستیابی بهتر به احتراق بدون شعله به دنبال خواهد داشت. زاهدزاده و امی [۱۵] پاشش های متقاطع و موازی را در یک محفظه احتراق موتور اسکرمت مقایسه کردند. بر اساس نتایج آن ها از آنجا که اختلاط مناسب سوخت و هوا تأثیر زیادی بر یک احتراق کارآمد دارد، دریافتند در پاشش متقاطع عمق نفوذ سوخت بهتر و ترکیب مناسب تر در قیاس با حالت پاشش موازی فراهم می کند. جی می و همکارانش [۱۶] دریافتند که تغییر پارامترهایی چون قطر خارجی و زاویه نازل های پاشش هوا و سوخت، تأثیری قابل ملاحظه بر فاصله نفوذ جریان سوخت و نیز نرخ بازچرخش محصولات (دو ویژگی مهم در احتراق بدون شعله) دارند. پنگفی و همکارانش [۱۷] با مطالعه بر روی پارامترهای مؤثر در عدد رینولدز از قبیل نازل های ورودی سوخت و هوا نشان دادند که احتراق بدون شعله در حالت پیش مخلوط در محفظه احتراق مورد مطالعه فقط در حالتی که عدد رینولدز از یک مقدار بحرانی فراتر رود، ایجاد می شود. جی یان چون و همکارانش [۱۸] نیز تأثیر نرخ مومنتوم جت سوخت و هوا را با تغییر خصوصیات هندسی نازل های ورودی بر احتراق بدون شعله بررسی کردند. آن ها دریافتند در حالتی که نرخ مومنتوم از یک مقدار بحرانی بالاتر باشد، رژیم احتراقی از حالت شعله معمولی به احتراق بدون شعله تغییر می کند. لیوبو و همکارانش [۱۹] در یک مطالعه عددی به بررسی تأثیر قطر و تعداد نازل هوا بر عملکرد محفظه احتراق پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد با کاهش قطر نازل، مومنتوم جت هوا افزایش یافته، همچنین با افزایش تعداد نازل پاشش هوا راندمان احتراق افزایش می یابد. پرونه و همکارانش [۲۰] با استفاده از مفهوم جدیدی از پیکربندی یک کوره صنعتی شامل ۵ محفظه و ۳ خروجی محصولات احتراق، دسترسی به احتراق بدون شعله با استفاده از اکسیژن خالص را مهیا کردند. کاهش میزان انتشار NOx نیز از دیگر نتایج ایشان بود.

با توجه به تحقیقات اخیر و نیز اهمیت نقش صنعت در تولید آلاینده ها و آسیب رساندن به محیط زیست، بررسی پارامترهای هندسی دخیل در عملکرد محفظه های احتراق

شیمیایی پیچیده و اغلب نامعلوم، می‌توانند به‌طور صحیحی نادیده گرفته شوند. یک مدل برای در نظرگیری برهم‌کنش شیمیایی و آشفستگی در اختیار است که مدل مفهوم اتلاف گردابه‌ای^۱ نامیده می‌شود. نرخ خالص تولید جز واکنش نام، در واکنش نام، توسط عبارت با مقدار کوچک‌تر از میان دو عبارت زیر به دست می‌آید:

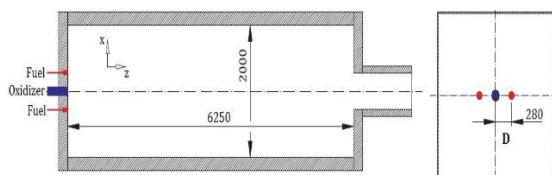
$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{Y_R}{v'_{i,r} M_{w,R}} \right) \quad (12)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\sum_P Y_R}{\sum_j^N v'_{j,r} M_{w,j}} \right) \quad (13)$$

در معادلات فوق، ضریب استوکیومتری واکنشگر نام در واکنش نام، $M_{w,i}$ وزن مولکولی گونه نام، A و B مقادیر ثابت تجربی، Y_R کسر جرمی محلی جز واکنش دهنده نام، ε نرخ اتلاف انرژی جنبشی متلاطم، k انرژی جنبشی آشفته بر واحد جرم و $v'_{j,r}$ ضریب استوکیومتری محصول نام در واکنش نام است. نرخ واکنش شیمیایی توسط مقیاس زمانی اختلاط گردابه‌های بزرگ، k/ε کنترل می‌شود و هر جا که آشفستگی موجود باشد ($k/\varepsilon > 0$)، احتراق رخ می‌دهد [۲۳].

۲-۲- هندسه محفظه احتراق و شرایط مرزی

آزمایش‌های احتراق بدون شعله با گاز طبیعی که در این مطالعه به‌عنوان مرجع [۲۴] استفاده شده، در محفظه احتراق IFRF در مقیاس نیمه‌صنعتی با ابعاد ۲۰۰۰ در ۲۰۰۰ در ۶۲۵۰ میلی‌متر انجام شده است (شکل ۱). اکسیدکننده از نازل مرکزی با قطر ۱۲۴ میلی‌متر و سوخت از دو نازل کناری با قطر داخلی ۱۰ میلی‌متر وارد می‌شوند. فاصله نازل‌های سوخت از نازل اکسیدکننده، ۲۸۰ میلی‌متر است.



شکل ۱: نمای دوبعدی محفظه احتراق IFRF مرجع [۲۴] (ابعاد: میلی‌متر)

در جدول ۱ شرایط عملکردی محفظه احتراق در شرایط آزمایشگاهی آورده شده است.

شبیه‌سازی عددی مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت ۱۶ انجام گردیده است. در پژوهش حاضر با توجه به عدم پیچیدگی هندسی دامنه حل، جریان آشفته

درستی روش محاسباتی و درستی خواص است که برای دیواره‌های احاطه‌کننده و محیط واسطه در نظر گرفته می‌شود [۲۲]. در شبیه‌سازی بسیاری از سیستم‌های احتراقی، استفاده از مدل تشعشعی P1 مفید است. مدل تابش P1 ساده‌ترین مدل از مدل کلی‌تر تابشی P-N است که بر اساس بسط شدت تابش به سری‌های اورتوگونال هارمونیک کروی است. اگر تنها از چهار ترم در سری‌ها استفاده شود، معادله (۷) برای فلاکس تابشی q_r به دست می‌آید:

$$q_r = -\frac{1}{3(\sigma + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \quad (7)$$

که σ و σ_s به ترتیب ثابت استفان بولتزمن و ضریب پراکنش، C ضریب خطی غیر ایزوتروپیک و G شدت تابش برخوردی است. با تعریف تابع Γ به صورت رابطه (۸):

$$\Gamma = \frac{1}{3(\sigma + \sigma_s) - C\sigma_s} \quad (8)$$

معادله انتقال تابش برخوردی به صورت رابطه (۹) نوشته می‌شود:

$$\nabla \cdot (\Gamma \nabla G) - aG + 4a\sigma T^4 = 0 \quad (9)$$

که a ضریب جذب است. با تلفیق معادلات فوق، معادله زیر به دست می‌آید:

$$-\nabla \cdot q_r = aG - 4a\sigma T^4 \quad (10)$$

ترم سمت چپ معادله (۱۰) مستقیماً در معادله انرژی به‌عنوان چشمه یا چاه حرارتی تابشی جایگزین می‌شود. اختلاط و انتقال اجزای واکنش شیمیایی با حل کردن معادلات بقا برای هر جزء شیمیایی از ترکیبی که توصیف‌کننده دیفیوژن، جابه‌جایی و منابع واکنش است، مدل می‌شود. برای حل معادلات بقا برای اجزای شیمیایی، کسر جرمی محلی هر جزء واکنش شیمیایی (Y_i) از طریق معادله جابه‌جایی-پخش برای جزء واکنش نام حل می‌شود. معادله بقای اجزا شکل کلی رابطه زیر را دارد:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i \quad (11)$$

در این رابطه، \vec{J}_i فلاکس دیفیوژن جزء نام و R_i نرخ خالص تشکیل گونه نام از واکنش شیمیایی است. بیشتر سوخت‌ها سریع می‌سوزند و نرخ کلی واکنش در آن‌ها با اختلاط آشفته کنترل می‌شود. در چنین مواردی گفته می‌شود که احتراق توسط اختلاط محدود می‌شود و نرخ‌های جنبشی

^۱. Eddy Dissipation Concept (EDC) model

دادند که در پیش‌بینی اجزای شیمیایی واکنش، عملکرد بهتری داشت. در این مطالعه، یک مکانیزم واکنش کلی پنج‌مرحله‌ای که در جدول ۲ آورده شده، مورد استفاده قرار گرفته است. این مکانیزم شامل سه واکنش برای متان، یک واکنش برای اتان و یک واکنش برای پروپان است [۳۰].

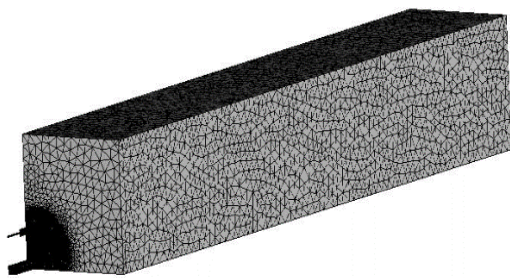
جدول ۲: واکنش‌های مکانیزم کلی [۳۰]

واکنش	واکنش
$\text{CH}_4 + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$	واکنش ۱
$\text{CO} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	واکنش ۲
$\text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	واکنش ۳
$\text{C}_2\text{H}_6 + 3.5\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	واکنش ۴
$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	واکنش ۵

در ورودی‌ها (جریان سوخت و اکسیدکننده)، از شرط مرزی دبی ورودی ثابت و در خروج از شرط مرزی فشار (فشار محیط) استفاده شده است. دیواره محفظه با دمای ثابت ۱۵۰۰ کلوین و ضریب تشعشع داخلی ۰/۶ در نظر گرفته شده است. معیار هم‌گرایی برای معادله پیوستگی مقدار باقیمانده 10^{-5} و برای سایر معادلات بقا 10^{-6} تعریف شده است.

۳- اعتبارسنجی

از آنجا که هندسه محفظه و دیگر شرایط مسئله متقارن هستند، تنها یک‌چهارم از محفظه احتراق شبکه‌بندی و به‌عنوان میدان محاسباتی انتخاب شده است (شکل ۲).



شکل ۲: شبکه محاسباتی در شبیه‌سازی

به‌منظور دستیابی به حل مستقل از شبکه‌بندی، تعداد سلول‌های محاسباتی در دو حالت ۶۲۴۰۰۰ و ۱۲۳۶۰۰۰ سلول بررسی شده‌اند. نتایج شکل (۳) که برای میدان سرعت محوری و توزیع دما در محور مرکز محفظه به دست آمده، حاکی از آن است که برای کاهش هزینه‌های محاسباتی به دلیل تفاوت کم دو محاسبه، استفاده از شبکه‌بندی با ۶۲۴۰۰۰ مناسب و بهینه است.

با مدل k-ε و شرایط تابع دیواره استاندارد حل شده است. همچنین حالت SIMPLE برای برهم‌کنش فشار-سرعت مورد استفاده قرار گرفته است. یک از مهم‌ترین مسائل در شبیه‌سازی احتراق بدون شعله، انتخاب مدل احتراقی مناسب است. ربولو و همکارانش [۲۵] با استفاده از مدل‌های متفاوت احتراقی دریافتند به علت اینکه نرخ واکنش در رژیم احتراقی بدون شعله آهسته‌تر و آرام‌تر از احتراق معمولی است و خصوصیات مقیاس زمانی مربوط به واکنش شیمیایی قابل مقایسه با مقیاس زمانی برای اختلاط آشفستگی است، مدل احتراقی مفهوم اتلاف گردابه‌ای، پیش‌بینی بهتری برای احتراق بدون شعله ارائه می‌دهد.

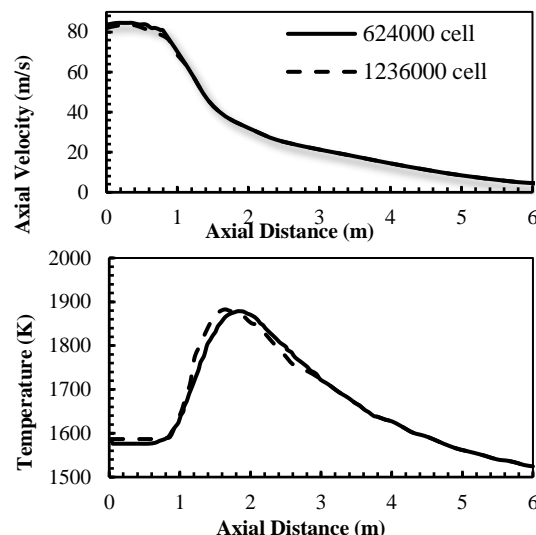
جدول ۱: شرایط عملکردی محفظه احتراق IFRF در شرایط

آزمایشگاهی [۲۴]

پارامتر	دبی (Kg/h)	دما (K)	ترکیبات (درصد حجمی)
سوخت	۴۷	۲۹۸	$\text{CH}_4=۸۷/۸$ $\text{C}_2\text{H}_6=۴/۶$ $\text{C}_3\text{H}_8=۱/۶$ $\text{N}_2=۵/۵$
اکسیدکننده	۸۳۰	۱۵۷۳	$\text{O}_2=۱۹/۵$ $\text{N}_2=۵۹/۱$ $\text{H}_2\text{O}=۱۵$ $\text{CO}_2=۶/۴$ $\text{NO} 110 \text{ PPM}$
گازهای خروجی	۸۷۷	۱۴۹۳	$\text{O}_2=۱/۶$ ۱۴۰ ppm NO_x

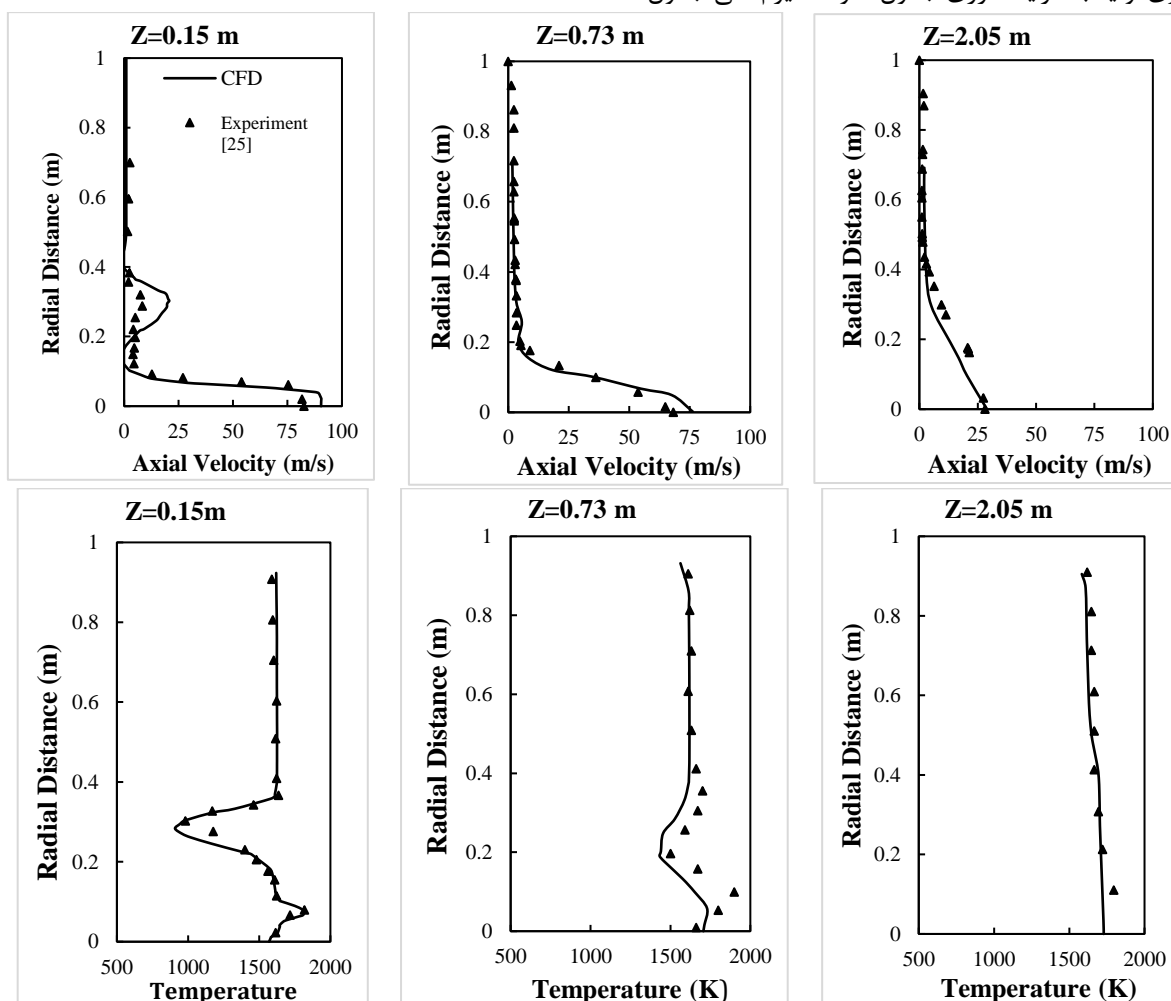
بیشتر واکنش‌های احتراقی، تعداد زیادی از واکنش‌های بنیادی را شامل می‌شوند؛ برای مثال در احتراق متان و هوا تا ۳۵۲ واکنش بنیادی و ۵۳ جزء واکنش تشخیص داده شده است [۲۶]. در شبیه‌سازی‌های عددی، استفاده از مکانیزم‌ها با این تعداد واکنش، از نظر هزینه محاسباتی معمولاً به‌صرفه نیست. برای کاهش زمان محاسبات، از سینتیک‌های کلی استفاده می‌شود که توسط کارهای آزمایشگاهی و عددی تخمین زده شده‌اند [۲۷]. در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در زمینه ارائه مکانیزم‌های واکنش دقیق‌تر انجام گرفته است. تائوچی و همکارانش [۲۸] برای احتراق متان تحت شرایط بدون شعله و برای حالت هوای غیر پیش‌گرم، مکانیزمی کلی ارائه دادند. همچنین فی‌فی و همکارانش [۲۹] با بررسی نواقص چهار مکانیزم متداول یک مکانیزم کلی با عنوان RJLM ارائه

۲ انجام گرفت و نتایج مربوط به پروفیل سرعت محوری و توزیع دما در راستای شعاعی در فواصل ۰/۱۵، ۰/۷۳ و ۲/۰۵ متری از ابتدای محفظه به دست آمد. در شکل (۴) مقایسه نتایج عددی به دست آمده با نتایج تجربی [۲۴] آمده است. همچنین در جدول ۳ میزان خطای محاسباتی در شبیه‌سازی برای توزیع دما و سرعت محوری در مکان‌های مختلف محفظه آورده شده است. بیشترین خطا در نزدیکی ناحیه پاشش سوخت مشاهده می‌شود. دلیل این امر احتمالاً در نظر نگرفتن اجزای شیمیایی میانی همچون OH در مکانیزم کلی است. از این رو جزئیات دقیقی از واکنش‌های شیمیایی به‌ویژه در مناطق پرسوخت قابل برداشت نیست. به‌طور کلی با توجه به نتایج شبیه‌سازی و نیز کاهش چشمگیر هزینه محاسباتی با استفاده از مکانیزم کلی با تقریب نسبتاً خوبی می‌توان به این نتایج استناد کرد.



شکل ۳: نتایج آزمون حل استقلال از شبکه برای میدان سرعت محوری (بالا) و توزیع دما (پایین) در محور محفظه

برای بررسی درستی نتایج حاصل از محاسبات عددی، شبیه‌سازی اولیه با شرایط مرزی جدول ۱ و مکانیزم کلی جدول



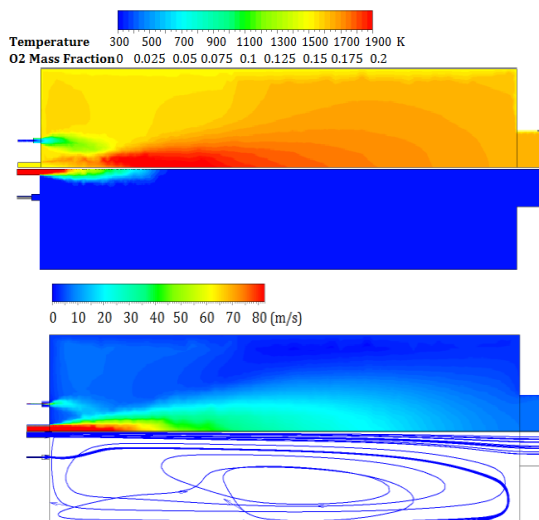
شکل ۴: مقایسه نتایج تجربی [۲۴] و عددی برای سرعت محوری (بالا)، توزیع دما (پایین) برای سه راستای شعاعی در فواصل $Z=0/15$ ، $Z=0/73$ و $Z=2/05$

جدول ۳: مقادیر خطای محاسباتی در مکان‌های مختلف محفظه احتراق برای دما و سرعت محوری (درصد)

پارامتر	مکان	X= ۰/۱ m	X= ۰/۲ m	X= ۰/۶ m
دما	Z= ۰/۱۵ m	۱/۵ %	۲/۹ %	۰/۵ %
	Z= ۰/۷۳ m	۱۲ %	۴/۵ %	۰/۵ %
	Z= ۲/۰۵ m	۷/۸ %	۱/۲ %	۲/۴ %
سرعت محوری	Z= ۰/۱۵ m	۱۳/۳ %	۱۱/۵ %	۰/۵ %
	Z= ۰/۷۳ m	۵/۶ %	۱/۲ %	۱ %
	Z= ۲/۰۵ m	۱۰ %	۸/۵ %	۴/۸ %

با توجه به دمای بالای گازهای حاصل از احتراق و همچنین ضرایب جذب و گسیل بالای دو جزء واکنش دی‌اکسید کربن و بخار آب که اصلی‌ترین جزء واکنش‌ها در محصولات احتراق هستند، تابش در توزیع دمای داخل کوره نقشی بسزا دارد. در بیشتر مناطق نتایج مربوط به مدل تشعشعی DO تفاوت چندانی با نتایج مدل P1 ندارد. بنابراین در این مطالعه به علت هزینه‌های محاسباتی کمتر، از مدل تابشی P1 استفاده شده است.

برای تشریح منطقه واکنش، کانتورهای سرعت محوری، توزیع دما و نرخ واکنش جزء واکنش اکسیژن برای حالت پایه در شکل (۶) نشان داده شده است. مولکول‌های اکسیژن به‌طور قابل توجهی در ناحیه‌ای که جریان‌های سوخت و اکسیدکننده اختلاط می‌یابند، مصرف می‌شوند. در نتیجه، دما در منطقه واکنش، بالاتر از سایر مناطق است.

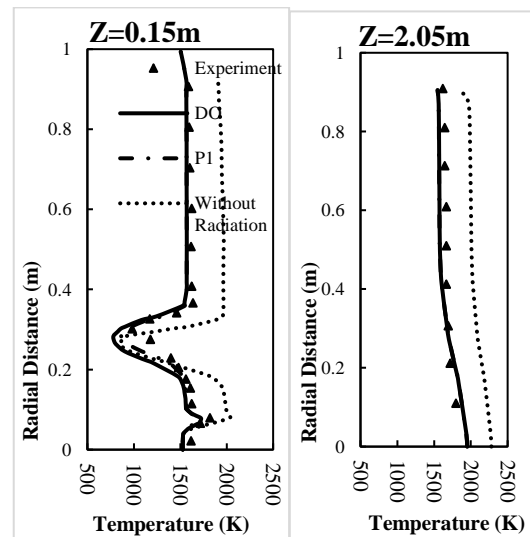


شکل ۶: کانتور دما و کسر جرمی اکسیژن (بالا) و کانتور سرعت و خطوط جریان (راست)، در شرایط جدول ۱

در خطوط جریان رسم‌شده در شکل (۶) بازچرخش جریان در محفظه احتراق مورد مطالعه، قابل مشاهده است. نرخ

۴- نتایج

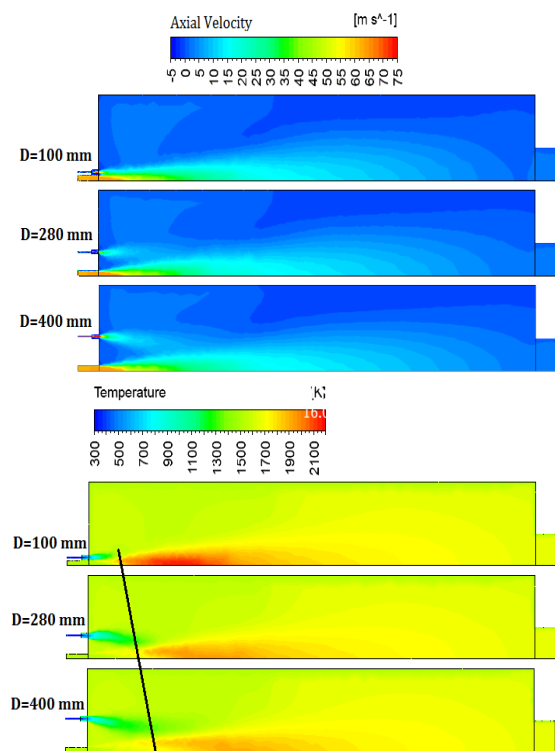
در فرایندهای احتراقی، به علت دمای بالای گازهای حاصل از احتراق، انتقال حرارت تابشی، اهمیت زیادی دارد. یکی از موضوعات مهم در پیش‌بینی صحیح میزان این انتقال حرارت، تعیین مدل تابشی مناسب است. دو مدل تابشی پرکاربرد، مدل‌های DO و P1 هستند. نتایج مربوط به این دو مدل تابشی با ثابت نگه داشتن دیگر شرایط شبیه‌سازی مقایسه شده است. در همه شبیه‌سازی‌ها محاسبه ضرایب جذب و گسیل با استفاده از مدل WSGGM انجام شده است [۳۱]. در شکل (۵) نتایج مربوط به دمای کوره در مقاطع مختلف شعاعی در حالت‌های مختلف از منظر اعمال تابش در مقایسه با نتایج تجربی نشان داده شده است.



شکل ۵: مقایسه نتایج توزیع دما برای حالات بدون در نظر گرفتن تابش، با مدل تابشی P1 و با مدل تابشی DO با نتایج تجربی [۲۴] در دو راستای شعاعی در فواصل $Z=۰/۱۵$ و $Z=۲/۰۵$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، دما در حالت بدون تابش در حدود ۵۰۰ کلوین بیش از واقعیت پیش‌بینی شده است.

جریان‌های ورودی با گازهای بازگشتی حاصل از احتراق و سپس به دلیل ایجاد احتراق در محفظه افزایش یافته است. این پدیده از ملزومات رسیدن به رژیم احتراق بدون شعله است.



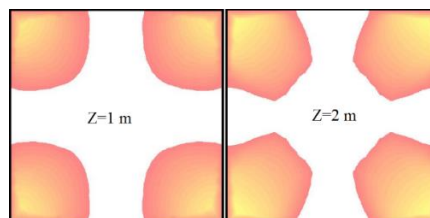
شکل ۸: کانتورهای سرعت محوری (بالا) و دما (پایین) در صفحه XZ در حالات مختلف D

فاصله گرفتن نازل سوخت از مرکز محفظه، جریان سوخت توسط مقادیر بیشتری از محصولات احتراق بازگشتی رقیق شده، از طرفی دمای آن پیش از ورود به منطقه واکنش افزایش می‌یابد. با رقیق‌تر شدن واکنش دهنده‌ها از شدت احتراق در منطقه واکنش کاسته می‌شود و در نتیجه، دما در Dهای بزرگ‌تر در منطقه واکنش کمتر است. این کاهش دمای احتراق به دلیل حضور مؤثرتر جریان برگشتی در ورودی سوخت است. تغییر فاصله نازل‌های سوخت و اکسیدکننده بیشتر در ناحیه بالادست محفظه احتراق تأثیرگذار است، ناحیه‌ای که سوخت و اکسیدکننده برای ورود به ناحیه واکنش با یکدیگر مخلوط می‌شوند. همان‌طور که در پروفیل دمای محوری مشخص است، هرچه فاصله نازل‌ها افزایش یابد، ناحیه واکنش در راستای محور محفظه (Z) به جلوتر کشیده شده، جابه‌جا می‌شود. حداکثر دمای احتراق در محفظه با $D=100$ میلی‌متر در $Z=1/55$ متر و در محفظه با $D=460$ میلی‌متر در $Z=2/19$ متر رخ داده است.

بازچرخش، اولین بار توسط وونینگ [۶] به صورت معادله (۱۲) تعریف شد:

$$K_v = \frac{m_e}{(m_a + m_f)} = \frac{\iint_{A(up)} \rho v_x dy dz - m_a - m_f}{(m_a + m_f)} \quad (12)$$

این ضریب به صورت نسبت دبی جریان بازگشتی محصولات احتراق (m_e) به مجموع دبی‌های ورودی سوخت و اکسیدکننده ($m_a + m_f$) است. در این رابطه، $A(up)$ مساحت مقطع عرضی محفظه با سرعت محوری منفی (v_x) است. در شکل (۷) سطح مقطع جریان برگشتی $A(up)$ برای دو صفحه عرضی در فواصل محوری ۱ و ۲ متر از بالادست محفظه احتراق نشان داده شده است. مقادیر محاسبه‌شده برای نرخ بازچرخش در این دو مقطع به ترتیب ۲/۱۶ و ۴/۰۲ است.

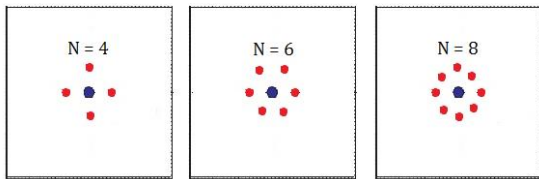


شکل ۷: سطح مقطع جریان برگشتی $A(up)$ در دو مقطع عرضی $Z=1$ متر (چپ) و $Z=2$ متر (راست)

فاصله نازل‌های سوخت و اکسیدکننده، یکی از پارامترهای مؤثر بر عملکرد احتراق بدون شعله است. در این بخش، اثر تغییر فاصله نازل‌های پاشش سوخت و اکسیدکننده (D) در سه فاصله ۱۰۰، ۲۸۰ و ۴۶۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۸) کانتورهای سرعت محوری و دما در صفحه XZ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل با خط مشکی مورب مشخص است، با افزایش D آغاز ناحیه واکنش به بالادست منتقل و ضمن افزایش پهنای شعله، بر طول جابه‌جایی شعله افزوده شده است. همچنین توزیع دما در $D=400$ میلی‌متر یکنواخت‌تر و با گرادین کمتر نسبت به حالت $D=100$ میلی‌متر است.

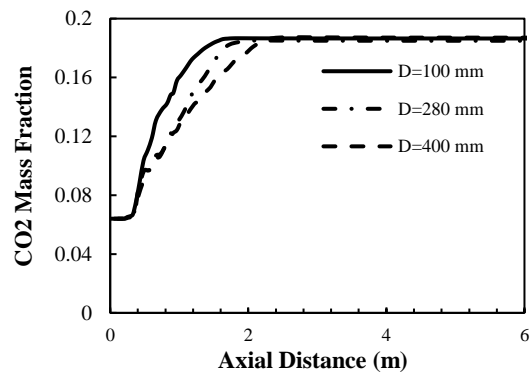
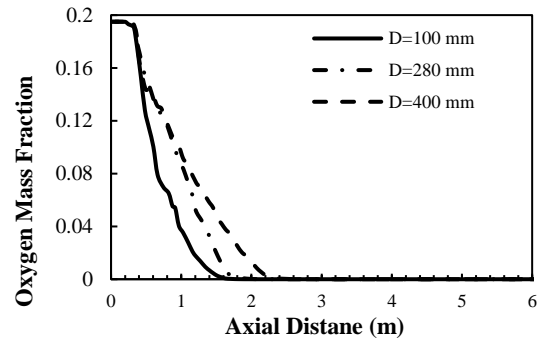
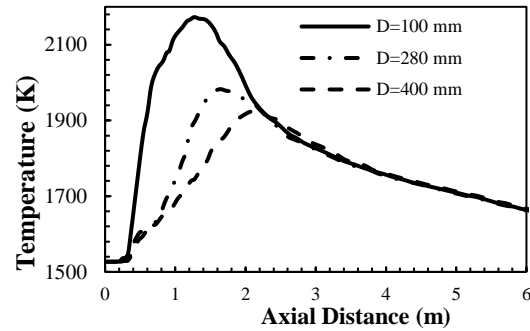
نمودارهای شکل (۹) تأثیر افزایش فاصله نازل‌های سوخت و اکسیدکننده را بر جریان و خصوصیات احتراق از جمله توزیع دما و جز واکنش‌های O_2 و CO_2 نشان می‌دهند. با افزایش D تأثیر پاشنده (جت) سوخت بر جریان مرکزی اکسیدکننده در بالادست جریان تضعیف شده است؛ زیرا مکان رسیدن جریان‌های اکسیدکننده و سوخت به پایین دست محفظه کشیده می‌شود. دما ابتدا به واسطه ترکیب

ناپایدار نشود، به دلیل دخالت بیشتر محصولات احتراق برگشتی، شرایطی مطلوب‌تر برای ایجاد احتراق بدون شعله در محفظه های احتراق صنعتی مهیا می‌کند. یکی دیگر از پارامترهای بررسی شده در مطالعه حاضر، تعداد نازل‌های پاشش سوخت (N) است. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده مقدار دبی ورودی سوخت ثابت فرض شده (۴۷Kg/h) و تعداد نازل‌ها مطابق شکل ۱۰ از ۴ تا ۸ تغییر کرده است. فاصله نازل‌ها در همان مقدار ۲۸۰ میلی‌متر مرجع ثابت فرض شده است.



شکل ۱۰: چینش نازل‌های ورودی سوخت در تعداد (N) مختلف

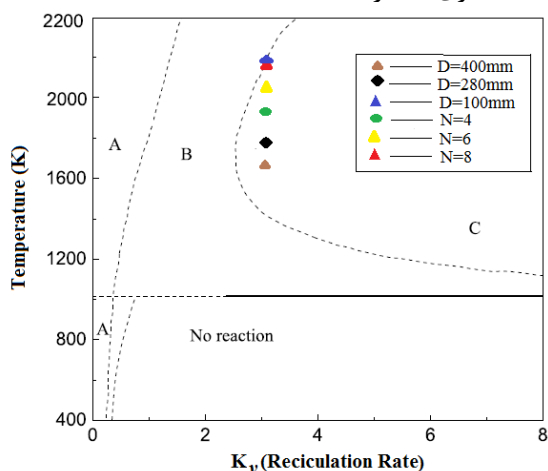
در شکل (۱۱) تأثیر تغییر تعداد نازل‌های پاشش سوخت بر خصوصیات احتراق نشان داده شده است. با توجه به نمودار توزیع دما با افزایش تعداد پاشنده‌ها (N)، اوج دمای محفظه بالاتر رفته و حد پایین آن ثابت مانده است. در Nهای بالاتر به دلیل گستردگی سوخت در فضای وسیع‌تر و هم‌پوشانی بیشتر بین واکنش‌دهنده‌ها فضایی کمتر برای ورود گازهای داغ برگشتی به ناحیه واکنش وجود دارد و در نتیجه، دخالت کمتری در فرایند احتراق نسبت به Nهای کمتر دارند. همچنین از آنجا که دبی ورودی سوخت به محفظه، ثابت فرض شده است، با افزایش تعداد پاشنده سوخت، سرعت ورودی سوخت کاهش یافته، اختلاف سرعت بین ورودی هوا و سوخت افزایش می‌یابد. در نتیجه اختلاط سوخت و هوای ورودی از ناحیه بالادستی شروع می‌شود. این امر باعث کشیده شدن ناحیه واکنش به سمت بالادست و مصرف سریع‌تر اکسیژن می‌گردد. نمودار غلظت اکسیژن در راستای محور مرکزی محفظه، بیانگر اختلاط سریع‌تر سوخت و هوا در این ناحیه است. همچنین در تعداد پاشنده های پایین‌تر دخالت CO₂ به‌عنوان یک جزء واکنش از محصولات احتراق برگشتی در فرایند احتراق بیشتر است. از آنجا که با افزایش تعداد پاشنده‌ها اوج دمای محفظه افزایش یافته، گرادیان دمای بیشتری در محفظه احتراق ایجاد می‌شود، توزیع دما از حالت یکنواختی خارج و از شرایط داشتن احتراق بدون شعله که مهم‌ترین مشخصه آن کمترین گرادیان دما در محفظه است، دورتر می‌شود.



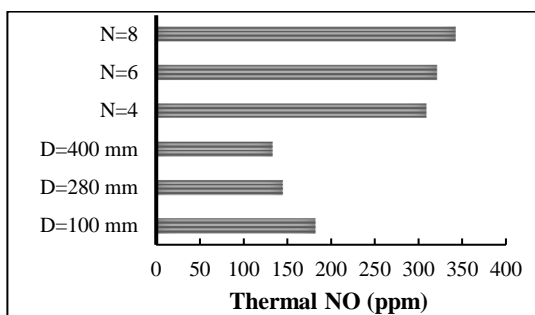
شکل ۹: تأثیر افزایش فاصله نازل‌های سوخت و اکسیدکننده (D) بر توزیع دما (بالا)، کسر جرمی O₂ (وسط) و کسر جرمی CO₂ (پایین)

با افزایش فاصله نازل سوخت از نازل اکسیدکننده در بالادست محفظه ناحیه واکنش در راستای شعاعی از محور محفظه فاصله گرفته، حجم بیشتری را فرامی‌گیرد. توزیع کسرهای جرمی O₂ و CO₂ به ترتیب نمایانگر نفوذ جت هوای ورودی و برگشت گازهای داغ حاصل از احتراق هستند. نمودار مصرف اکسیژن نیز حاکی از آن است که با افزایش D کسر جرمی اکسیژن در Zهای بالاتری به صفر رسیده است. این امر گواه بر کشیده شدن ناحیه واکنش به پایین‌دست محفظه به‌واسطه افزایش فاصله نازل‌های سوخت و اکسیدکننده است. تأثیر D بر جریان و خصوصیات احتراق بیشتر در بالادست جریان بوده، تفاوت‌ها در پایین‌دست بسیار ناچیز است. به صورت کلی، افزایش فاصله نازل‌های سوخت و اکسیدکننده تا جایی که شعله

دارد و در احتراق بدون شعله سعی بر آن است که اوج دمای محفظه کاهش داده شود تا توزیع دمای یکنواخت‌تر و نهایتاً NO کمتری انتشار یابد.



شکل ۱۲: تغییرات دمای احتراق با نرخ بازچرخش محصولات در مقطع $Z=1000$ میلی‌متر برای حالات مختلف (K_v)

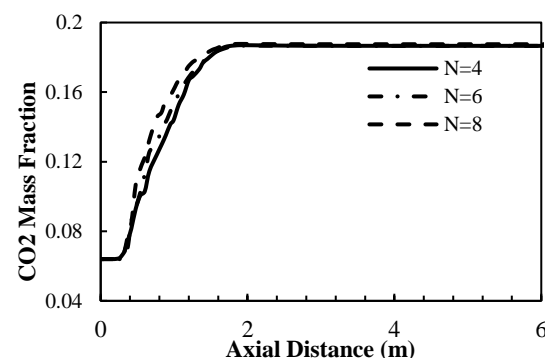
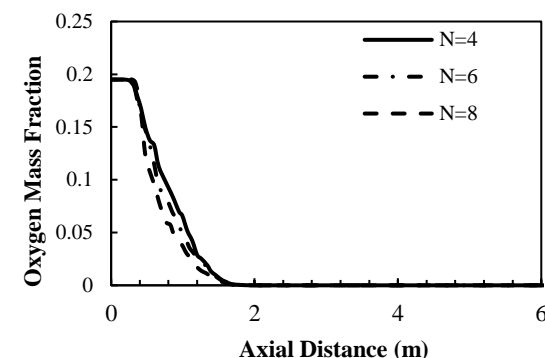
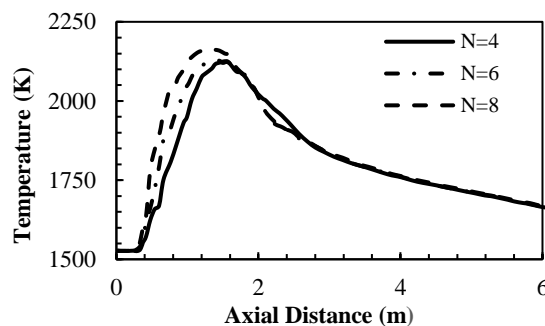


شکل ۱۳: تأثیر تغییر پارامترهای مختلف بر انتشار گرمایی NO

از آنجا که دمای احتراق با افزایش تعداد نازل‌های پاشش سوخت (N) بالا می‌رود، میزان NO در محفظه نیز افزایش یافته است. همچنین با افزایش فاصله نازل سوخت نسبت به نازل اکسیدکننده، به دلیل تداخل بهتر جت سوخت با جریان برگشتی، میزان رقیق شدن واکنش‌دهنده‌ها افزایش یافته است که این امر باعث کاهش دمای احتراق می‌شود. با کاهش دمای احتراق میزان NO گرمایی نیز کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه عددی به تأثیر پارامترهای هندسی فاصله نازل‌های پاشش سوخت و اکسیدکننده و تعداد نازل پاشش سوخت بر احتراق بدون شعله در محفظه احتراق IRFR با استفاده از سوخت گاز طبیعی پرداخته شد. نتایج پیش‌بینی‌شده در مقایسه با داده‌های تجربی که برای حالت پایه ارائه شده‌اند، تقریباً سازگاری خوبی داشت. همچنین



شکل ۱۱: تأثیر تعداد نازل پاشش سوخت (N) بر توزیع دما (بالا)، کسر جرمی O_2 (وسط) و کسر جرمی CO_2 (پایین)

در شکل (۱۲) رابطه بین نرخ بازچرخش و دمای احتراق محفظه برای سوخت متان که توسط وونینگ ارائه شده، برای حالات مختلف احتراق نشان داده شده است. در این نمودار، سه رژیم احتراقی شامل احتراق معمولی (A)، ناحیه شعله ناپایدار (B) و احتراق بدون شعله (C) برحسب K_v و دمای محفظه مشخص شده‌اند. تغییرات دمای محفظه برحسب نرخ بازچرخش در مقطع $Z=1000$ میلی‌متر برای حالات مختلف آورده شده است. با توجه به این نمودار می‌توان دریافت که در تعداد پاشنده‌های بالا ($N=8$) و نیز حالت $D=100$ میلی‌متر شرایط احتراق از حالت بدون شعله به مرز ناپایداری نزدیک شده است.

در شکل (۱۳) میزان گرمایی پیش‌بینی‌شده برای حالات مختلف بررسی شده نشان داده شده است. میزان تولید آلاینده NO حرارتی، وابستگی شدید به دمای احتراق

نتایج حاکی از آن است که با فاصله گرفتن نازل سوخت از نازل اکسیدکننده، واکنش‌دهنده‌ها با جریان برگشتی بیشتری تداخل داشته، باعث رقیق‌تر شدن و افزایش دمای آن‌ها پیش از ورود به ناحیه واکنش می‌شوند. این امر موجب کاهش دمای اوج احتراق و NO_x گرمایی شد. همچنین با نزدیک کردن فاصله نازل‌ها ناحیه واکنش به بالادست محفظه کشیده شد. با افزایش تعداد پاشنده‌ها اوج دمای محفظه افزایش یافته، گرادیان دمای بیشتری در محفظه احتراق شد، از این رو تولید NO حرارتی افزایش یافت و شرایط احتراق از حالت بدون شعله به مرز شعله ناپایدار نزدیک شد که تأثیری مضر بر عملکرد احتراق در کوره‌های صنعتی است.

یک مکانیزم کلی پنج‌مرحله‌ای در شبیه‌سازی به کار گرفته شد که از لحاظ محاسباتی، بسیار به‌صرفه‌تر و از نظر صحت نتایج، قابل قبول بود. از جمله عوامل خطا می‌توان به خطای مکانیزم واکنش به‌کاررفته و فرضیات ساده‌سازی همچون دمای ثابت دیواره داخلی محفظه احتراق اشاره کرد. ابتدا تأثیر اعمال و عدم اعمال تشعشع و نیز تفاوت مدل‌های تشعشعی P1 و DO بر حل احتراق بدون شعله مورد بررسی قرار گرفت. با اعمال مدل تابشی، تفاوت‌های دمایی در حدود ۵۰۰ کلوین ایجاد شد و همچنین در بیشتر مناطق نتایج مربوط به مدل تشعشعی DO تفاوت چندانی با نتایج مدل P1 نداشت که برای کاهش هزینه‌های محاسباتی مدل P1 به کار گرفته شد.

مراجع

- [1] J. Warnatz, U. Maas and R.W. Dibble, *COMBUSTION: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiment, Pollutant formation*, 4th ed., Springer, 2006.
- [2] R.W. Schefer, D.M. Wicksall and S.K. Aggarwal, "Combustion of Hydrogen-Enriched Methane in A Lean Premixed Swirl Stabilized Burner", *Proceedings of the Combustion*, Vol. 29, 2002, pp. 843- 851.
- [3] Y.B. Zeldovich and P.Y. Sadvnikov, *Oxidation of Nitrogen in Combustion*, Science Academy of USSR, 1947.
- [4] L. Lazic, M.A. Varga and J. Kizek "An Experimental Study of the Influence of FGR on NO_x Formation", *Material in Technology*, Vol. 38, No. 5, January 2004, pp. 269–274.
- [5] A. Cavaliere, M.D. Joannon, "Mild Combustion", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 30, 2004, pp. 329-366.
- [6] J.A. Wüning, J.G. Wüning, "Flameless Oxidation to Reduce Thermal NO -Formation", *Progress in Energy Combustion Science*, Vol. 23, 1997, pp. 81-94.
- [7] F. Hu, P. Li, J. Guo, Z. Liu, L. Wang and et al., "Global Reaction Mechanisms for MILD Oxy-Combustion of Methane", *Energy*, Vol. 147, 2018, pp. 839–857.
- [8] Y. Tu, K. Su, H. Liu, Z. Wang, Y. Xie, C. Zheng and et al., "MILD Combustion of Natural Gas using Low Preheating Temperature Air in an Industrial Furnace", *Fuel Processing Technology*, Vol. 156, 2017, pp. 72–81.
- [۹] مازیار دهقان، یوسف رحمانی، سیف‌الله سعدالدین، محمدصادق دلی‌پور و داود دومیری گنجی، «بررسی انتقال حرارت در فوم‌های فلزی در حضور جابه‌جایی اجباری و تشعشع حرارتی به روش اغتشاش هموتوپی»، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۴، شماره ۴۶، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۱-۹.
- [10] M.R. Shakeel, Y.S. Sanusi and E.M. Mokheimer, "Numerical Modeling of Oxy-Fuel Combustion in a Model Gas Turbine Combustor: Effect of Combustion Chemistry and Radiation Model", *Energy Procedia*, Vol. 142, 2017, pp. 1647-1652.
- [11] M.H. Bordbar, G. Wecl and T. Hyppanen, "A Line by Line Based Weighted Sum of Gray Gases Model for Inhomogeneous $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ Mixture in Oxy-fired Combustion", *Combust Flame*, Vol. 161, 2014, pp. 2435–45.
- [12] C.V. Silva, F.H. R. Franca and H.A. Vielmo, "Analysis of the Turbulent, Non-Premixed Combustion of Natural Gas in a Cylindrical Chamber with and without Thermal Radiation", *Combustion Science and Technology*, Vol. 179, No. 8, 2007, pp. 1605–1630.
- [۱۳] رضا صباغ و نادر رهبر، «بررسی تأثیر شکل هندسی بر بیشینه دمای جداره نوک فلر و توزیع آلاینده‌های خروجی آن»، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۳، شماره ۴۰، بهار ۱۳۹۴، صفحه ۴۴-۵۷.

- [14] Y. Tu, H. Liu, S. Chen and et al., "Effect of Furnace Chamber Shape on MILD Combustion of Natural Gas", *Applied Thermal Engineering*, 2014, pp.1-12.
- [۱۵] مصطفی زاهدزاده و فتح‌الله امی، «مطالعه عددی پاشش متقاطع جت‌های صوتی دومرحله‌ای در جریان عرضی مافوق صوت بعد از یک پله»، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۷، شماره ۵۶، بهار ۱۳۹۸، صفحه ۲۰-۲۹.
- [16] J. Mi, F. Wang, P. Li and B.B. Dally, "Modified Vitiation in a Moderate or Intense Low Oxygen Dilution (MILD) Combustion Furnace", *Energy & Fuels*, 2012, pp. 265-277.
- [17] P. Li, J. Mi, B.B. Dally, R.A. Craig and F. Wang, "Premixed Moderate or Intense Low Oxygen Dilution (MILD) Combustion from a Single Jet Burner in a Laboratory Scale Furnace", *Energy & Fuels*, 2011, pp. 2782-2793.
- [18] J. Mi, P. Lit, B.B. Dally and R.A. Craig, "Importance of Initial Momentum Rate and Air-Fuel Premixing on Moderate or Intense Low Oxygen Dilution (MILD) Combustion in a Recuperative Furnace", *Energy & Fuels*, 2009, pp. 5349-5356.
- [19] L. Bo, W. Yuanhua and X. Hong, "Numerical Study of Air Nozzles on Mild Combustion for Application to Forward Flow Furnace", *China Petroleum Processing and Petrochemical Technology*, 2016, pp. 108-122.
- [20] D. Perrone, T. Castiglione, P. Morrone, S. Barbarello and M. Amelio, "NOx Emissions for Oxy-Mild Combustion of Pulverized Coal High Temperature Pre-heated Oxygen", *Energy Procedia*, Vol. 148, 2018, pp. 567-574.
- [21] K.K. Kuo, *Principles of Combustion*, Wiley, USA, 1996.
- [22] E. Fawzy and E.S. Habik, *Fundamentals and Technology of Combustion*, 1st ed., Elsevier Science, 2002.
- [23] B.F. Magnussen, "The Eddy Dissipation Concept for Turbulent Combustion Modeling, its Physical and Practical Implications", Technical. Report Norwegian Institute of Technology, January 1990.
- [24] S. Orsino and R. Weber, "Numerical Simulation of Combustion of Natural Gas with High-Temperature Air", *Combustion Science and Technology*, 2001, pp. 1-34.
- [25] A. Rebola, P.J. Coelho and M. Costa, "Assessment of the Performance of Several Turbulence and Combustion Models in the Numerical Simulation of a Flameless Combustor", *Combustion Science and Technology*, 2012, pp. 600-626.
- [26] GRI-Mech 3.0, The Combustion Laboratory at the University of California, Berkeley Department of Mechanical Engineering, 1999.
- [27] C. Westbrook and F. Dryer, "Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames", *Combustion Science and Technology*, 1981, pp. 31-43.
- [28] T. Taojie, Y. Wenming and L. Hao, "A refined global reaction mechanism for lowly preheated MILD combustion of methane", *Energy & Fuels*, 2017, pp. 10144-10157.
- [29] F. Wang, P. Li, J. Mi and j. Wang, "A Refined Global Reaction Mechanism for Modeling Coal Combustion Under Moderate or Intense Low-oxygen Dilution Condition", *Energy*, Vol. 157, 2018, pp. 764-777.
- [30] W.P. Jones and R.P. Lindstedt, "Global Reaction Schemes for Hydrocarbon Combustion", *Combust Flame*, Vol. 73, 1988, pp. 233-49.
- [31] M. Vascellari and G. Cau, "Influence of Turbulence-Chemical Interaction on CFD Pulverized Coal MILD Combustion Modeling", *Fuel*, 2012, pp.90-101.