



مطالعه عددی فرایند احتراق زغال سنگ پودر شده در یک راکتور صنعتی ورود همزمان

نیما غیائی طبری^{۱*}، حسین محسنیان^۲، مهران زرکش^۳^۱ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان^۲ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۵

چکیده

در این مطالعه به شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی یک راکتور احتراق صنعتی نمونه ورود همزمان پرداخته شده‌است. معادلات و واکنش‌های حاکم بر مسئله پیاده‌سازی و پارامترهای عملکردی مطابق با کارهای آزمایشگاهی در نظر گرفته شده‌است. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی، با داده‌های تجربی و مقالات مشابه موجود مقایسه و صحت‌سنجی شده‌است. چهار مدل تبخیر مواد فرار بررسی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه گردیده‌است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند، اگرچه مدل کوبایاشی دارای زمان محاسباتی بالاتری است، اما جواب‌های نزدیک‌تری به نتایج تجربی ارائه می‌دهد. تأثیر افزایش/کاهش اندازه ذرات زغال سنگ تزریق شده مورد مطالعه قرار گرفته شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش اندازه ذرات سوخت از ۵۵ تا ۱۲۰ میکرومتر منجر به کاهش دمای گاز درون راکتور شده‌است. با کاهش اندازه متوسط ذرات از ۵۵ به ۳۰ میکرومتر، دما در نزدیکی شعله از ۱۸۰۰ کلوین تا نزدیک ۱۹۰۰ کلوین افزایش یافته‌است.

کلمات کلیدی: مطالعه عددی؛ احتراق؛ راکتور ورود همزمان؛ زغال سنگ پودر شده.

Numerical Study of a Pulverized Coal Combustion Process In an Industrial Entrained Flow Reactor

Nima Ghiasi Tabari^{1*}, Hossein Mohsenian², Mehran Zarkesh³¹ Assist. Prof., Mech. Eng., Dashtestan Branch, Islamic Azad University, Dashtestan, Iran² Ph.D. Student, Mech. Eng., Dashtestan Branch, Islamic Azad University, Dashtestan, Iran³ Assist., Prof., Mech. Eng., Dashtestan Branch, Islamic Azad University, Dashtestan, Iran

Abstract

In this study, a three dimensional numerical simulation of an industrial entrained flow combustion reactor has been conducted. The governing equations and reactions are implemented and the operating parameters are considered according to the experimental works. The results obtained from the numerical simulation are validated by comparing with existing experimental data and similar published papers. Four different devolatilization models are investigated and the simulation results are compared to each other. The obtained results show that although the Kobayashi model has a higher calculation time, it provides more accurate results compare to the experimental results. The effect of increasing/decreasing of injected coal particle sizes are studied. The results show that increasing of the coal particle sizes from 55 to 120 μm has led to a decrease in the gas temperature inside the reactor. By reducing the average coal particle size from 55 to 30 μm , the gas temperature close to the flame has increased from 1800 K to 1900 K.

Keywords: Numerical study; Combustion, Entrained flow reactor; Pulverized Coal.

* نویسنده مسئول: تلفن: ۰۹۱۲۶۱۵۶۶۲۴؛ فکس: ۰۲۱۲۲۶۶۴۵۰۳

آدرس پست الکترونیک: nimaghiasi71@gmail.com

۱- مقدمه

راکتور احتراق اصلی‌ترین تجهیز موجود در یک نیروگاه تولید توان است و درک صحیح از فرایندهای انجام شده درون آن، می‌تواند در طراحی مناسب و بهینه آن کمک شایانی نماید. تحقیقات و مطالعات در این زمینه به سرعت در حال گسترش است. در دهه گذشته، منابع زغال‌سنگی تقریباً نیمی از افزایش تقاضای انرژی در جهان را تامین کرده است [۱] و به دلیل فراوانی و قیمت پایین، هنوز نیز به عنوان یکی از منابع اساسی جهت تولید انرژی شناخته می‌شود [۲]. راکتورهای احتراق نمونه ورود هم‌زمان وسیع‌ترین و موفق‌ترین نوع راکتورهای احتراق مورد استفاده در مقیاس‌های صنعتی هستند که اغلب برای زغال‌سنگ استفاده شده‌اند [۳]. در این نوع راکتورها، زغال‌سنگ در ابتدا آسیاب و پودر شده و به ذراتی با اندازه کمتر از ۱۰۰ میکرون تبدیل می‌شود. سپس زغال‌سنگ پودر شده همراه با بخشی از هوای احتراق که توسط مجموعه‌ای از مشعل‌ها که در اطراف کوره قرار دارند، به‌طور هم‌زمان به درون راکتور تزریق می‌شوند. از این‌رو به این نوع راکتورهای احتراق، راکتورهای احتراق ورود هم‌زمان گفته می‌شود. به علت هزینه سرمایه‌گذاری بالاتر این نوع سیستم‌های احتراق، استفاده از سیستم‌های احتراق ورود هم‌زمان تنها در مقیاس‌های بزرگ صنعتی توجیه‌پذیر است. پیچیدگی و بالای بودن هزینه‌های اجرایی پروژه‌های مرتبط با احتراق به خصوص در مقیاس صنعتی منجر به توسعه مدل‌ها و نرم افزارهای مرتبط شده است. مشکلات ارزیابی و دسترسی به نواحی درون این سیستم‌ها، وابسته بودن پارامترهای عملکردی مختلف به یکدیگر و چالش‌های مرتبط با وقوع فرایندهایی مانند اثرات متقابل فازهای گاز-ذره، آزاد شدن مواد فرار از ذرات سوخت، تجزیه حرارتی، احتراق، انتقال حرارت و انتقال جرم، برخی از پیچیدگی‌های مرتبط با این سیستم‌ها است. مدل‌ها و زیرمدل‌های ارائه شده در مجلات و تحقیقات مختلف، کمک شایانی در جهت درک این فرایندها و توسعه این سیستم‌ها کرده است. تحقیقات ارزش‌مندی در زمینه پدیده‌های احتراق به صورت هم‌زمان در مقیاس آزمایشگاهی در مراکز علمی-دانشگاهی و نیز مقیاس صنعتی در صنایع مرتبط، در حال انجام است.

به صورت کلی، مدل‌های ارائه شده برای فرایند احتراق را می‌توان در چهار گروه متفاوت دسته‌بندی نمود: مدل تعادل ترمودینامیکی، مدل شبکه راکتور (RNM^۱)، مدل شبکه عصبی (ANN^۲) و مدل CFD. در مدل‌سازی به روش تعادل ترمودینامیکی حداکثر آنتروپی و یا حداقل انرژی آزاد گیبس مورد مطالعه قرار گرفته می‌شود. مدل‌سازی به روش تعادل ترمودینامیکی در بسیاری از مطالعات مانند مقالات [۴-۶] استفاده گردیده است که به منظور بررسی پارامترهای عملکردی نسبت به دیگر روش‌ها کاربردی‌تر است. مدل شبکه راکتور به کمک شبکه‌ای از راکتورهای مختلف، فرایند احتراق درون محفظه را مدل‌سازی می‌کند. این روش اولین بار توسط دانکورت [۷] معرفی گردید. مدل‌سازی به روش شبکه عصبی بر قابلیت یادگیری خود به خودی سیستم با استفاده از تجربیات قبلی، الگوهای بدست آمده در پاسخ‌های سیستم و بهبود عملکرد آن با تقلید از برخی ویژگی‌های انسانی متمرکز است. لی و همکارانش [۸] از این روش مدل‌سازی استفاده نمودند و تاثیر ارزش حرارتی سوخت تزریق شده و طول محفظه را بر راندمان یک راکتور بستر سیال مورد مطالعه قرار دادند. روش دیگری که یکی از پیشرفته‌ترین و در عین حال ارزان‌ترین ابزارها به منظور تحلیل و مطالعه فرایندهای احتراق، استفاده از مدل‌سازی CFD^۳ است. به صورت کلی، دو رویکرد متفاوت به منظور تعریف تعاملات بین فازی گاز-جامد درون راکتورهای احتراق وجود دارد. رویکرد اول با نام روش اوپلری- اوپلری و رویکرد دوم با نام روش اوپلری-لاگرانژی مشهور است. در روش اوپلری-اوپلری، دو فاز گاز و ذره مانند یک زنجیره درهم تنیده با ترم‌های تعاملی مناسب در نظر گرفته می‌شوند که کوپلینگ بین فازها را نشان می‌دهند. این روش مدل‌سازی مشخصات ماکروسکوپی محفظه مورد مطالعه را با هزینه‌های محاسباتی کم می‌تواند پیش‌بینی کند [۹]. اسمایل و همکاران [۱۰] به بررسی تاثیر محتوی رطوبت موجود در سوخت تزریق شده بر ارزش حرارتی و راندمان راکتور احتراق با رویکرد اوپلری-اوپلری پرداختند. آن‌ها نشان دادند که افزایش رطوبت تاثیر منفی بر ارزش حرارتی سوخت و عملکرد راکتور دارد و تاثیر رطوبت در نسبت‌های هم ارزی بالاتر کاهش می‌یابد. مونتیرو و همکاران [۱۱] از رویکرد اوپلری-اوپلری استفاده

³ Computational Fluid Dynamic

¹ Reactor Network Model

² Artificial Neural Network

بررسی نمودند و تاثیر آن را بر دما، میزان تبخیر مواد فرار و میزان تبدیل زغال سنگ به گاز مطالعه نمودند.

درک فرایندها و شبیه‌سازی جزئیات پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی درون راکتورهای احتراق، یکی از مراحل کلیدی به منظور توسعه راکتورهای احتراق است. هدف اصلی این مطالعه، مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی یک راکتور احتراق صنعتی نمونه ورود همزمان به صورت سه‌بعدی است. پس از تزریق سوخت زغال‌سنگ به درون راکتور، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با داده‌های تجربی و نیز نتایج خروجی از مقالات مشابه مقایسه گردیده است. جهت رسیدن به این هدف، از هفت واکنش همگن (گاز-گاز) و ناهمگن (گاز-ذرات سوخت) به منظور در نظر گرفتن تعاملات بین فازی استفاده شده است و نرخ‌های سینتیکی واکنش‌ها از مقالات مشابه استخراج شده است. کانتورهای دمایی و غلظت مولی گونه‌های تولیدی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. سپس چهار مدل مختلف فرایند تبخیر مواد فرار از ذرات سوخت بررسی شده و تاثیر هر مدل، بر نتایج بدست آمده مقایسه گردیده است. پس از آن، تاثیر افزایش یا کاهش اندازه ذرات سوخت تزریق شده، بر محصولات خروجی در چهار حالت متفاوت بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی برای دما و ترکیب گازهای تولیدشده در خروجی راکتور مقایسه شده است. سپس تاثیر مدل تابشی در سه حالت مختلف بررسی شده و نتایج خروجی در فواصل شعاعی، در راستای محور راکتور احتراق مقایسه شده است. به کمک این چنین مطالعاتی، می‌توان همه فضای طراحی را مد نظر قرار داد و بسیاری از موارد را پیش از اجرای عملی پروژه، بررسی و تحلیل نمود و هزینه‌های اجرای پروژه را تا حد زیادی بهبود بخشید.

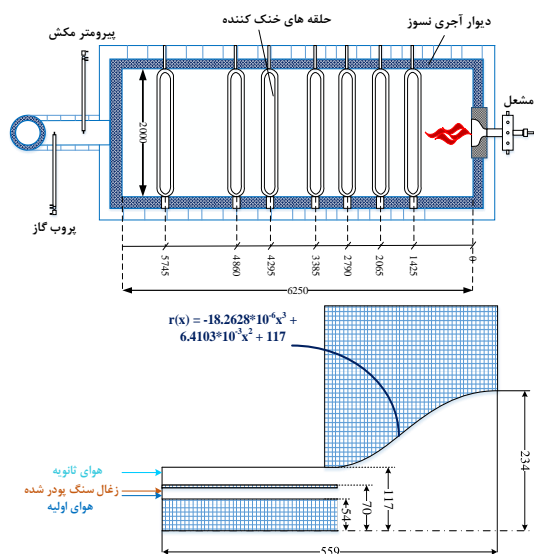
۲- جزئیات مدل

راکتور احتراق صنعتی نمونه ورود همزمان مورد بررسی در این مطالعه، مربوط به کوره صنعتی ساخته شده توسط شرکت بین‌المللی تحقیقاتی شعله (IFRF^۱) است. شکل شماتیک این کوره صنعتی در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۹، ۲۰]. این کوره صنعتی با ظرفیت ۲/۵ مگاوات دارای سطح مقطع مربعی ۲m × ۲m و طول ۶/۲۵m است. هفت حلقه خنک‌کننده مستقل روی دیواره‌های خارجی کوره تعبیه شده است. شرایط

کرده و تبدلات جرم، مومنتوم و انرژی برای فازهای جامد و گاز را در نظر گرفتند و نتیجه گرفتند که افزایش دما درون راکتور، راندمان راکتور را افزایش و میزان تار تولید شده را کاهش می‌دهد.

از آن‌جا که رویکرد اوپلری- اوپلری، دوفاز را به صورت یک فاز تعادلی در نظر می‌گیرد و قادر به تشخیص ویژگی‌های فاز گسسته (ذرات) نیست، رویکرد اوپلری- لاگرانژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این رویکرد، فاز گاز به عنوان فاز پیوسته و فاز ذرات به عنوان فاز گسسته در نظر گرفته می‌شوند. چوی و همکاران [۱۲] یک راکتور ورود همزمان را با استفاده از شبیه‌سازی عددی به صورت پارامتریک بررسی نمودند. آن‌ها با تغییر هندسه محفظه، قطر انژکتور و سرعت تزریق اکسیدکننده، میدان جریان درون راکتور را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که اگرچه در نواحی نزدیک به ورودی جریان درون راکتور تغییر می‌کند، اما پس از طول مشخصی از ورودی، میدان جریان تقریباً ثابت باقی می‌ماند. کو و همکاران [۱۳] از نرم‌افزار این فوم استفاده کرده و تاثیر پنج پارامتر عملکردی شامل اندازه ذرات سوخت تزریق شده، دما، نوع سوخت، نسبت مولی بخار به کربن و نوع اکسیدکننده را بررسی نموده و غلظت مولی گونه‌های تولید شده را پیش‌بینی نموده‌اند. تاثیر افزایش دما به عنوان پارامتری مهم در میزان غلظت مواد و افزایش کیفیت تبدیل سوخت به انرژی شرح داده شده است. پارک و همکاران [۱۴] و جونگ و همکاران [۱۵] به مدل‌سازی CFD فرایند احتراق در یک راکتور ورود همزمان با استفاده از سوخت زغال سنگ و رویکرد اوپلری- لاگرانژی پرداختند و از داده‌های آزمایشگاهی جهت مقایسه و صحت سنجی نتایج بدست آمده استفاده کردند. وانگ و همکاران [۱۶] به کمک رویکرد اوپلری- لاگرانژی یک راکتور احتراق ورود همزمان را بررسی نمودند و نتایج حاصل از شبیه‌سازی، شامل دما و توزیع غلظت مولی گونه‌ها را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه نمودند. حسینی و همکاران [۱۷] به شبیه‌سازی CFD یک راکتور ورود همزمان پرداختند و تاثیر شبکه-بندی‌های مختلف، مدل‌های توربولانسی و واکنش‌های گاز-ذره را بر نتایج خروجی مورد مطالعه قرار دادند. یوان و همکاران [۱۸] با استفاده از روش CFD، تاثیر چهار زاویه چرخشی مختلف تزریق زغال سنگ به درون یک راکتور ورود همزمان

^۱ International Flame Research Foundations



شکل ۱- کوره صنعتی IFRI مورد مطالعه [۱۹ و ۲۰]

جدول ۱- شرایط عملکردی کوره صنعتی IFRI [۲۰]

مشخصات گازهای اکسیدکننده ورودی		
ورودی های کوره	هوای اولیه ورودی	هوای ثانویه ورودی
نرخ جریان جرمی (kg h ⁻¹)	۴۲۱	۲۶۸۴
دما (K)	۳۴۳/۱۵	۵۷۳/۱۵
مساحت ورودی (m ²)	۴/۹۴۱۷ × ۱۰ ^{-۲}	۲/۷۶۱۱ × ۱۰ ^{-۲}
سرعت محوری میانگین (m s ⁻¹)	۲۳/۰۲	۴۳/۸۳
سرعت چرخشی میانگین (m s ⁻¹)	—	۴۹/۴۲
مشخصات سوخت زغال سنگ ورودی		
نرخ جریان جرمی زغال سنگ (kg h ⁻¹)	چگالی ذرات زغال سنگ (kg m ⁻³)	دما (K)
۲۶۳	۱۰۰۰	۳۴۳/۱۵

عملکردی این کوره صنعتی در جدول ۱ [۲۰] آورده شده است. مشعل ورودی این کوره دارای یک هندسه آئرودینامیک است. هوای اولیه به عنوان گاز اکسیدکننده همراه با سوخت زغال سنگ به صورت پودر شده از طریق مجرای حلقوی داخلی به درون کوره تزریق می شوند و تحت واکنش های احتراق قرار می گیرد. هوای ثانویه نیز که از طریق مجرای هم محور بیرونی در اطراف مجرای داخلی قرار گرفته شده است، به درون کوره تزریق می شود. به منظور جلوگیری از ایجاد گردابه و جدایش جریان، مجرای ورودی کوره و محفظه داخلی آن با یک پروفیل آرام و صاف به هم متصل می شوند که معادله شعاع انحنای آن در شکل ۱ آورده شده است. از آنجایی که دما در راکتور احتراق از دمای نقطه جوش خاکستر بالاتر است، اغلب خاکستر به اسلگ (سرباره) مذاب تبدیل می شود و از پایین محفظه تخلیه می شود. در این مطالعه اسلگ مذاب مدل نشده است و فرض شده است که در واکنش ها شرکت نمی کند. سوخت زغال سنگ، قبل از تزریق به راکتور خرد شده، سپس خشک می شود و به صورت پودر به ذراتی با اندازه بسیار کوچک کروی تبدیل می شود. در اغلب راکتورها و کوره های ورود همزمان که در دمای بالا کار می کنند، جهت جلوگیری از رسوبات دوده^۱ بر روی سطوح و تشکیل گازهای آلاینده، با ۱۰ الی ۲۰ درصد هوای احتراق اضافی کار می کنند [۲۱]. در این مطالعه نسبت هم ارزی سوخت به هوا برابر ۰/۸۵ در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی دیواره های این کوره در جدول ۲ ذکر شده است. فرایند احتراق درون راکتور مورد مطالعه با در نظر گرفتن سوخت ورودی زغال سنگ بیتومنس نمونه گاتل بورن^۲ hvBb^۳ شبیه سازی شده است. آنالیز تقریبی و نهایی این زغال سنگ در جدول ۳ نشان داده شده است. فرض شده است که توزیع اندازه ذرات پودر زغال سنگ با تابع توزیع روزین-رامر^۴ مطابقت داشته باشد. پارامترهای مربوط به این تابع در جدول ۴ آورده شده است.

³ High Volatile B Bituminous

⁴ Rosin-Rammler distribution

¹ Soot

² Gottelborn

۳- مدل ریاضی

۳-۱- معادلات حاکم بر مسئله

مدل سازی انجام شده به صورت سه بعدی، جریان حالت پایدار با عدد ماخ پایین (تراکم ناپذیر) و توربولانس در نظر گرفته شده است. شبیه سازی عددی در نرم افزار انسیس-فلوئنت [۲۳] انجام شده است. از رویکرد اویلری-لاگرانژی جهت شبیه سازی CFD رآکتور استفاده شده است به این صورت که ذرات سوخت به عنوان فاز گسسته و ذرات اکسیدکننده هوا به عنوان فاز پیوسته در نظر گرفته می شوند. فاز ذرات گسسته در دستگاه مرجع لاگرانژین مدل سازی شده است. ذرات پودر شده زغال سنگ به صورت کروی در فاز پیوسته پراکنده شده اند. بر این اساس، معادلات ناویر استوکس، انرژی و بقای گونه ها به صورت سه بعدی متوسط زمانی حل شده است. تأثیر توربولانسی فاز گازی بر ذرات سوخت با مدل ردیابی تصادفی مدل سازی شده است. معادلات بقای حاکم بر فاز گسسته برای ذرات زغال سنگ به شرح زیر است [۱۳ و ۲۴]:

$$\nabla \cdot (\bar{\rho}_g \vec{u}_g) = S_{p,m} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\bar{\rho}_g \vec{u}_g \vec{u}_g) = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot (\vec{\tau}_{eff}) + S_{p,mom} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\vec{u}_g (\bar{\rho}_g \vec{E} + \bar{p})) = \nabla \cdot \alpha_{eff} \nabla h_s + S_h + S_{p,h} + S_{rad} \quad (3)$$

$$E = h_s - \frac{\bar{p}}{\bar{\rho}_g} + \frac{\vec{u}_g^2}{2} \quad (4)$$

$$\alpha_{eff} = \alpha_g + \frac{\mu_t}{Pr_t} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\bar{\rho}_g \vec{u}_g Y_i) = \nabla \cdot \bar{\rho}_g D_{i,eff} \nabla Y_i + S_{p,Y_i} + S_{Y_i} \quad (6)$$

$$D_{eff} = D_g + \frac{\mu_t}{\bar{\rho}_g Sc_t} \quad (7)$$

که در روابط فوق $S_{p,m}$ ، $S_{p,mom}$ ، $S_{p,h}$ و S_{p,Y_i} به ترتیب ترم های چشمه ناشی از انتقال جرم، مومنتوم، انرژی و گونه می باشند؛ S_h و S_{Y_i} ترم های چشمه واکنش های همگن؛ S_{rad} ترم چشمه مدل تشعشع؛ α_{eff} و D_{eff} به ترتیب نفوذ حرارتی دینامیکی مؤثر و ضریب نفوذ جرم گونه ها می باشند. کوپلینگ بین دو فاز (جامد و گاز) با محاسبه ترم های چشمه بین فازی ($S_{p,m}$ ، $S_{p,mom}$ ، $S_{p,h}$ و S_{p,Y_i}) در هر گام زمانی سیال برقرار

جدول ۲- شرایط مرزی دمایی دیواره های رآکتور [۲۰]

انتشار	دما (K)	دیواره
۰/۶	۵۷۳ - ۳۴۳	دیواره های کانال ورودی
۰/۶	۸۰۰	دیواره جلویی نازل تزریق زغال سنگ
۰/۶	۱۲۷۳	دیواره مشعل
۰/۵	۱۴۰۰	دیوار جلویی رآکتور
۰/۵	۱۴۰۰	دیواره استوانه ای رآکتور
۰/۴	۱۰۰۰	حلقه های خنک کننده
۰/۵	۱۳۰۰	دیواره پشتی رآکتور
۰/۵	۱۳۰۰	دیواره دودکش خروجی رآکتور

جدول ۳- مشخصات زغال سنگ مورد استفاده [۲۰ و ۲۲]

آنالیز تقریبی	آنالیز نهایی
کربن ثابت	C ۸۰/۳۶
خاکستر	O ۱۲/۱۷
مواد فرار	H ۵/۰۸
	N ۱/۴۵
LHV (MJ kg ⁻¹)	S ۰/۹۴

جدول ۴- توزیع ذرات زغال سنگ [۱۹ و ۲۰]

جرم (%)	قطر ذرات سوخت (μm)	دسته بندی غربال گری ذرات
۱	۱	۱
۴	۵	۲
۷	۱۰	۳
۲۴	۲۵	۴
۳۲	۵۰	۵
۱۹	۷۵	۶
۸	۱۰۰	۷
۴	۲۰۰	۸
۱	۳۰۰	۹
	۱ μm	حداکثر قطر ذرات
	۳۰۰ μm	حداقل قطر ذرات
	۴۵ μm	میانگین قطر ذرات
	۱/۲۹	پارامتر بخش شونده

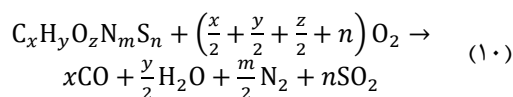
جدول ۵- ثابت‌های مدل توربولانسی $k-\epsilon$ [۲۸]

C_μ	$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	σ_k	σ_ϵ	Pr_t	Sc_t
۰/۰۹	۱/۴۴	۱/۹۲	۱/۰۰	۱/۳۰	۰/۸۵	۰/۷۰

که C_μ ثابت ویسکوزیته، ترم‌های $C_{1\epsilon}$ و $C_{2\epsilon}$ اعداد ثابت؛ σ_k و σ_ϵ اعداد پرناتل اغتشاشی برای k و ϵ ؛ Pr_t عدد پرناتل توربولانسی و Sc_t عدد اشمیت توربولانسی است.

۳-۳- مدل‌های واکنش

پس از گرمایش سریع، واکنش شیمیایی و فیزیکی مختلفی ناشی از جریان گاز داغ موجود در اطراف ذرات سوخت روی می‌دهد. واکنش‌های شیمیایی انجام شده درون راکتور احتراق شامل واکنش‌های اکسیداسیون مواد فرار تبخیر شده و احتراق ذرات زغال‌سنگ تزیق شده است [۲۹]. در گام اول، ذرات زغال‌سنگ از دمای محیط به دمایی می‌رسند که مواد فرار شروع به آزاد شدن می‌کنند. پس از گرمایش ذرات، احتراق مواد فرار و اکسایش زغال‌سنگ درون راکتور رخ می‌دهد. مواد فرار به صورت یک گونه گازی با صورت $C_xH_yO_zN_mS_n$ فرض شده است. به‌طور معمول فرایند احتراق زغال‌سنگ تحت شرایط کنترل شده اکسیداسیون انجام می‌شود و عموماً همراه با هوای اضافی انجام می‌شود. فرآیند اکسیداسیون و محصولات تولیدی شده ناشی از احتراق توسط رابطه زیر تعیین می‌شوند [۲۹]:



ضرایب استوکیومتریک واکنش‌های اکسیداسیون مواد فرار، براساس آنالیز نهایی زغال‌سنگ در جدول ۶ تعریف شده‌اند. پس از فرآیند تبخیر مواد فرار، زغال‌سنگ باقی‌مانده در ذرات سوخت، با گازهای موجود درون راکتور واکنش می‌دهد. واکنش‌های همگن و ناهمگن انجام شده درون راکتور در جدول ۶ ارائه شده‌است. نرخ واکنش‌های همگن با محاسبه دو مدل اتلاف گردابه / نرخ محدود و انتخاب مقدار کوچک‌تر تعیین می‌شود. مخلوط شدگی توربولانسی گونه‌های گازی با در نظر گرفتن مدل اتلاف گردابه بدون در نظر گرفتن مدل

می‌شود. از مدل $PSI-CELL^1$ [۲۵] جهت برقراری تعامل بین فازهای گسسته و پیوسته از طریق ترم‌های چشمه ذرات سوخت استفاده شده‌است.

پدیده‌های فیزیکی-شیمیایی مختلفی درون راکتور ورود همزمان اتفاق می‌افتد. این پدیده‌ها شامل واکنش‌های همگن و واکنش‌های ناهمگن، تبخیر مواد فرار از ذرات سوخت، جریان توربولانسی، جریان چندفازی همراه با مدل تابشی حین فرآیند احتراق می‌باشند. از این رو، به منظور ارزیابی و پیش‌بینی صحیحی از عملکرد راکتور لازم است، زیر مدل‌های مختلف پیاده‌سازی شوند.

۳-۲- مدل‌سازی توربولانسی

یکی از معروف‌ترین مدل‌های جریان‌های توربولانسی که در حل مسائل مهندسی و صنعتی به‌عنوان یک مدل پرکاربرد و استاندارد به شدت مورد اقبال قرار گرفته است، مدل $k-\epsilon$ است. در اکثر مطالعات انجام شده در زمینه، راکتورهای احتراق و کوره‌های صنعتی به خصوص در نمونه‌های ورود همزمان [۲۶ و ۲۷] از این مدل توربولانسی استفاده شده است. معادلات انتقال k و ϵ در مدل استاندارد این مدل به‌صورت معادلات (۸) و (۹) نوشته می‌شوند [۲۸].

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \bar{\rho} \epsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} G_k \bar{\rho} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (9)$$

که در روابط فوق k انرژی جنبشی توربولانسی، ϵ نرخ اتلاف، μ_t ویسکوزیته مولکولی توربولانسی، G_k تولید k به دلیل گرادیان‌های سرعت متوسط است. مقادیر ثابت‌های معادلات توربولانسی طبق مقادیر لیست شده در جدول ۵ استفاده شده است:

¹ Particle-Source-In-Cell model

(الف) مدل نرخ ثابت

در این مدل فرض شده است که مواد فرار موجود در سوخت با نرخ ثابتی آزاد می‌شوند. این مدل اولین بار توسط باوم [۳۴] پیشنهاد گردید:

$$-\frac{1}{f_{v,0}m_{p,0}} \frac{dm_p}{dt} = A_0 \quad (12)$$

که A_0 نرخ ثابتی (s^{-1}) است. در کارهای انجام شده توسط خان و وانگ [۳۵] و نیز پیلا [۳۶] این نرخ برابر $J \cdot kgmol^{-1}$ 1.07×10^{-4} در نظر گرفته شده است.

(ب) مدل تک نرخی

مقدار موارد فرار آزاد شده حین فرایند احتراق به مقدار مواد فرار موجود در ذرات سوخت مورد مطالعه بستگی دارد [۳۷]. به عبارت دیگر:

$$-\frac{dm_p}{dt} = k[m_p - (1 - f_{v,0})m_{p,0}] \quad (13)$$

که k نرخ سینتیکی (s^{-1}) واکنش تبخیر مواد فرار است و توسط رابطه آرینیوس طبق معادله (۱۴) معین می‌گردد:

$$k = Ae^{-\frac{E}{RT}} \quad (14)$$

که A عامل پیش‌نمایی و E انرژی فعال‌سازی واکنش می‌باشند که در این مطالعه به ترتیب برابر با 1.05×10^5 و 4.92×10^4 $J \cdot kgmol^{-1}$ 1.07×10^{-4} در نظر گرفته شده است [۳۵].

(ج) مدل نفوذ شیمیایی (CPD)

در این مدل رفتار ذرات سوخت تزریق شده به درون راکتور احتراق که به سرعت تحت حرارت قرار می‌گیرند، با تغییر شیمیایی ساختار این ذرات حین فرایند در نظر گرفته می‌شود. این تغییر ساختار به صورت یک تغییر در پیوندهای شیمیایی سوخت تزریق شده مدل‌سازی می‌شود که به طور کلی منجر به آزاد شدن گازهای سبک، چار و تار می‌شود. جزئیات کامل و خلاصه‌ای از فرایند مدل‌سازی شده به کمک این روش توسط فلچر [۳۸] ارائه شده است. جزئیات مدل CPD^۱ و مقادیر

نرخ محدود محاسبه می‌شود. در مدل اتلاف گردابه فرض بر این است که واکنش‌ها به محض برخورد واکنش‌دهنده‌ها اتفاق می‌افتد. نرخ خالص تولید یا مصرف گونه‌ها می‌تواند توسط رابطه (۱۱) محاسبه گردد [۲۷]:

$$R = \min \left(v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min R \left(\frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \right), v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \left(\frac{\sum_P Y_P}{\sum_j v'_{j,r} M_{w,j}} \right) \right) \quad (11)$$

جدول ۶- نرخ‌های سینتیکی واکنش‌های همگن و ناهمگن [۳۰-۳۳]

انرژی فعال‌سازی (J kmol ⁻¹)	ضریب پیش‌نما	واکنش
7.98×10^7	$2.0 \cdot 10^3$	$2C + O_2 \xrightarrow{k_1} 2CO$
1.25×10^8	0.7732	$+CO_2 \xrightarrow{k_2} 2COC$
1.49×10^8	1.18×10^{-10}	$C + 2H_2 \xrightarrow{k_3} CH_4$
1.68×10^8	6.8×10^{-15}	$H_2 + 0.5O_2 \xrightarrow{k_4} H_2O$
1.67×10^8	2.24×10^{12}	$CO + 0.5O_2 \xrightarrow{k_5} CO_2$
8.37×10^7	2.74×10^9	$CO + H_2O \xrightarrow{k_6} CO_2 + H_2$
2.39×10^8	9.5×10^{10}	$CO_2 + H_2 \xrightarrow{k_7} CO + H_2O$

۳-۴- مدل‌های تبخیر مواد فرار

در صورتیکه سوخت تزریق شده به درون راکتور احتراق دارای رطوبت باشد، در ابتدا با افزایش دما این رطوبت تبخیر می‌شود. پس از تبخیر همه رطوبت موجود در ذرات تزریق شده، فرایند تبخیر مواد فرار اتفاق می‌افتد. روش‌های مختلفی جهت مدل‌سازی فرایند تبخیر مواد فرار با رویکردهای متفاوت توسط محققان پیشنهاد شده‌است. در مسائل و جریان‌های مختلف، هرکدام از این مدل‌ها با توجه به سرعت و دقت محاسباتی که دارند مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در ادامه چهار مدل مختلف فرایند تبخیر مواد فرار استفاده شده در این مطالعه که بیشترین کاربرد را در مسائل مرتبط با احتراق درون محفظه‌های ورود همزمان دارند، مورد بررسی قرار گرفته است:

^۱ Chemical Percolation Devolatilization

عملکردی راکتور IFRI شبیه سازی و سپس شبکه بندی شده است. زیر مدل های مختلف جهت این فرایند پیاده سازی گردیده است. جهت اطمینان از نتایج بدست آمده از شبیه سازی عددی و افزایش دقت محاسباتی، ابتدا عدم وابستگی نتایج به شبکه بندی هندسه مورد بررسی قرار گرفته است. از شبکه بندی ساختاریافته جهت شبکه بندی هندسه راکتور احتراق استفاده شده است و جهت افزایش دقت محاسباتی، مش بندی انجام شده در نواحی نزدیک به مشعل بهبود یافته است. جهت رسیدن به بهینه ترین حالت از شبکه بندی مسئله، هندسه راکتور مورد مطالعه در چهار سطح مختلف از تعداد کل سلول های ۳۰۰،۰۰۰ برای شبکه بندی بزرگ تا تعداد کل سلول های ۹۰۰،۰۰۰ برای شبکه بندی کاملاً کوچک تقسیم بندی شده است. چهار سطح شبکه بندی شامل شبکه بندی درشت با ۳۰۰،۰۰۰ سلول (Mesh-1)، شبکه بندی متوسط با ۵۰۰،۰۰۰ سلول (Mesh-2)، شبکه بندی کوچک با ۷۰۰،۰۰۰ سلول (Mesh-3) و شبکه بندی بسیار کوچک با ۹۰۰،۰۰۰ سلول (Mesh-4) است و شبیه سازی به صورت مجزا برای هر شبکه بندی مورد مطالعه قرار گرفته است. تأثیر کوچک شدن شبکه بندی هندسه و افزایش تعداد سلول های محاسباتی بررسی شده است تا از دقت نتایج به دست آمده اطمینان حاصل شود. جهت مطالعه استقلال جواب های بدست آمده از شبیه سازی از شبکه بندی انجام شده، پروفیل های دما (شکل ۲ الف)، غلظت گونه های CO₂ (شکل ۲ ب) و O₂ (شکل ۲ ج) در راستای محور مرکزی راکتور بررسی شده اند. همان طور که مشاهده می شود، نتایج پس از افزایش تعداد شبکه بندی به بیش از ۷۰۰،۰۰۰ تغییرات ناچیزی دارند؛ بنابراین شبکه بندی با نام Mesh-3 جهت ادامه شبیه سازی انتخاب شده است. مطالعه شبکه بندی هندسه IFRI نشان می دهد که کاهش بیشتر اندازه شبکه بندی، در دقت نتایج بدست آمده تأثیری نداشته و تنها سبب افزایش هزینه و زمان محاسباتی شبیه سازی می گردد.

استفاده شده در این مطالعه در مرجع [۳۹] به صورت کامل ارائه شده است.

(د) مدل کوبیاشی

مدل کوبیاشی که به مدل دو نرخ رقابتی نیز مشهور است، در مقایسه با مدل های دیگر تخمینی مناسب از میزان گونه های تبخیر شده با زمان محاسباتی قابل قبول ارائه می دهد [۴۰] و [۴۱]. نرخ سینتیکی واکنش های فرایند تبخیر مواد فرار در این مدل، به کمک دو رابطه زیر تعیین می شوند [۴۲]. این مدل که توسط کوبیاشی پیشنهاد شده است، از دو نرخ رقابتی k_1 و k_2 تشکیل شده است که k_1 برای واکنش های در دمای پایین و k_2 برای واکنش های در دمای بالا استفاده می شود که توسط ضرایب مشخصی وزن داده شده اند. این مدل توسط رابطه (۱۵) تعریف می شود [۱۴].

$$\begin{aligned} & \frac{m_v(t)}{(1 - f_{w,0})m_{p,0} - m_a} \\ &= \int_0^t (\alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2) \exp\left(-\int_0^t (k_1 + k_2) dt\right) dt \end{aligned} \quad (15)$$

که در این رابطه، $m_v(t)$ جرم کلی مواد فرار تبخیر شده در زمان t (kg)؛ $m_{p,0}$ جرم اولیه ذرات سوخت m_a (kg)؛ جرم محتوای خاکستر (kg) ؛ $f_{w,0}$ کسر جرمی رطوبت؛ α_1 و α_2 فاکتورهای عملکردی؛ و k_1 و k_2 توسط روابط آرنیوس طبق معادلات (۱۶) و (۱۷) به دست می آیند [۱۴]:

$$k_1 = A_1 e^{-\left(\frac{E_1}{RT_p}\right)} \quad (16)$$

$$k_2 = A_2 e^{-\left(\frac{E_2}{RT_p}\right)} \quad (17)$$

که در این روابط A_1 و A_2 پارامترهای تبخیر مواد فرار می باشند.

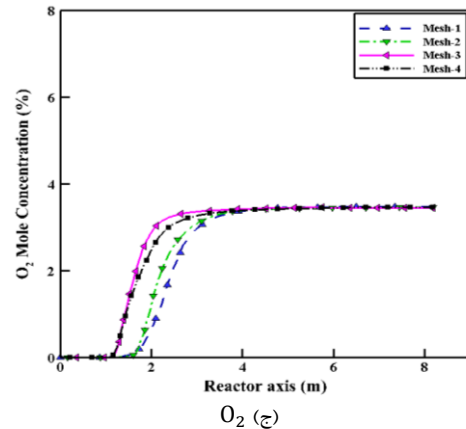
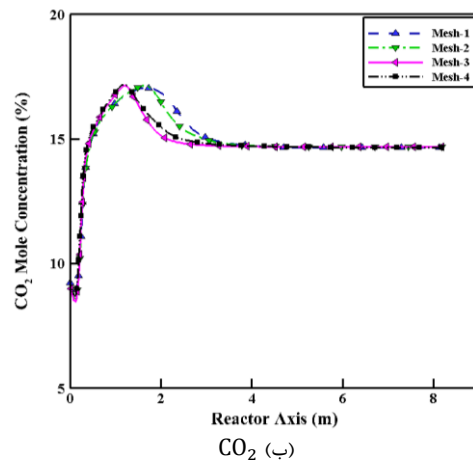
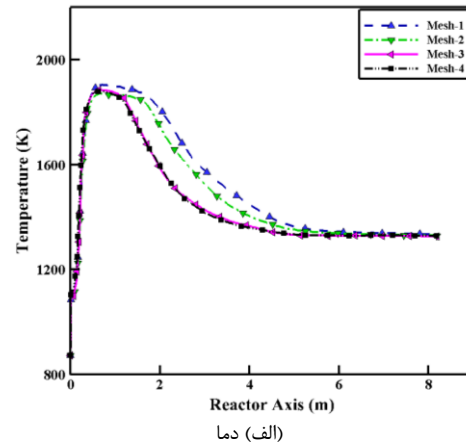
۴- شبیه سازی عددی و بررسی نتایج

۴-۱- مطالعه استقلال از شبکه

شبیه سازی انجام شده در نرم افزار انسیس-فلوئنت صورت گرفته است [۲۳]. مشخصات هندسی، ابعادی و شرایط

۴-۲- صحت سنجی مدل و نتایج بدست آمده از شبیه سازی عددی

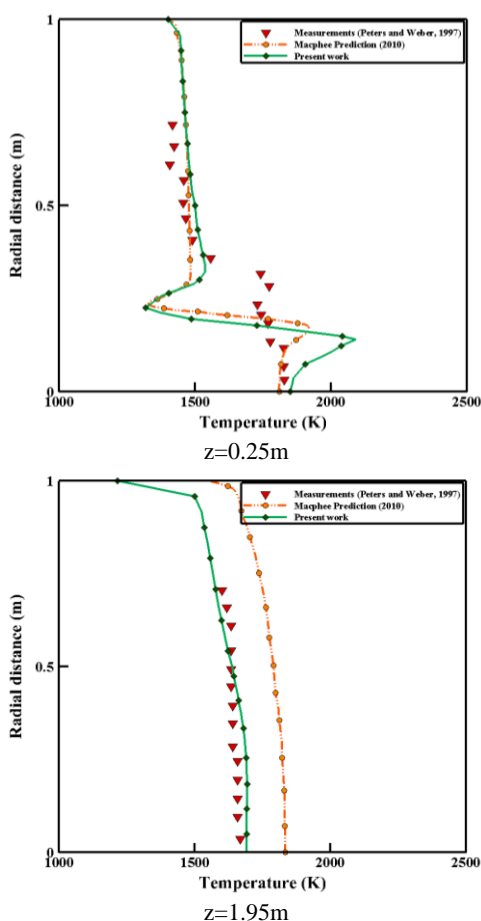
جریان سیال درون رآکتور احتراق به صورت توربولانس و به صورت مخلوط گاز-ذرات زغال سنگ است. از رویکرد اویلرین-لاگرانژین جهت در نظر گرفتن تعاملات گاز-ذره و حل این فرایند احتراق استفاده شده است. به صورت کلی، مراحل اصلی یک فرایند احتراق پس از تزریق سوخت به درون رآکتور احتراق ورود همزمان، شامل خشک شدن ذرات سوخت تزریق شده (در صورت مرطوب بودن)، تبخیر مواد فرار و انجام واکنش‌های همگن و ناهمگن است. این مراحل به صورت متوالی درون رآکتور انجام می‌شود. در این قسمت ابتدا بر اعتبارسنجی مدل ارائه شده برای رآکتور ورود هم‌زمان IFRI با سوخت ورودی زغال سنگ بیتومنس گاتل بورن hvBb^۱ پودر شده تمرکز شده است. این اعتبارسنجی با مقایسه مقادیر تجربی منتشرشده در مقالات با نتایج شبیه‌سازی عددی انجام شده در این بخش، صورت پذیرفته است. علاوه بر این مقایسه، به دلیل کمبود داده‌های آزمایشگاهی، نتایج خروجی از شبیه‌سازی انجام شده با مقاله مشابه دیگری نیز مقایسه شده است، تا از صحت نتایج بدست آمده اطمینان حاصل شود. با مطالعه اعتبار نتایج حاصل از شبیه‌سازی، صحت زیرمدل‌های مختلف بکار رفته در فرایندهای احتراق، تبخیر مواد فرار و نیز مدل‌های توربولانسی و تابشی استفاده شده و همچنین روش پیاده‌سازی حل مسئله را می‌توان مورد بررسی قرار داد. جهت صحت سنجی و ارزیابی درست نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی CFD، شرایط عملکردی واقعی رآکتور احتراق بکار رفته در صنعت به عنوان نمونه پایه (Present work) مشخص شده است. پروفیل‌های دما، سرعت و غلظت گونه‌های O₂ و CO₂ در راستای فواصل شعاعی رآکتور احتراق در دو فاصله ۰/۲۵m و ۱/۹۵m از ابتدای ورودی محفظه مورد بررسی قرار گرفته شده است و در شکل‌های ۳ تا ۶ آورده شده‌اند. دلیل انتخاب این دو فاصله شعاعی، وجود داده‌های تجربی در نقاط مختلف این فواصل درون رآکتور احتراق است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با داده‌های تجربی [۲۰] و نیز مقاله مشابه [۱۹] مقایسه شده است. مقایسه پروفیل‌های حاصل از شبیه‌سازی انجام شده نشان می‌دهد که مطابقت بسیار مناسبی بین توزیع دمایی، سرعت مماسی و نیز غلظت مولی گونه‌های مورد مطالعه



شکل ۲- پروفیل‌های (الف) دما، (ب) غلظت گونه CO₂ و (ج) غلظت گونه O₂ در راستای محور مرکزی رآکتور احتراق برای چهار شبکه‌بندی مختلف با تعداد سلول‌های Mesh-1) ۳۰۰،۰۰۰، (Mesh-2) ۵۰۰،۰۰۰، (Mesh-3) ۷۰۰،۰۰۰ و (Mesh-4) ۹۰۰،۰۰۰ و (3)

^۱ High Volatile B Bituminous

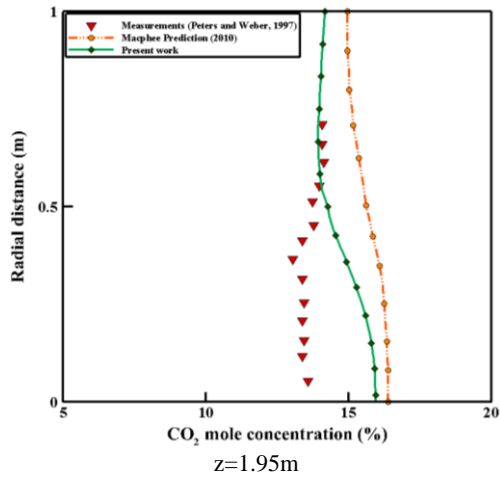
است و نهایتاً در خروجی راکتور به حدود ۱۴۰۰ کلوین رسیده است. پروفیل سرعت بدست آمده (شکل ۴) نماینده یک جت جریان قوی در مرکز راکتور است. پروفیل غلظت مول O_2 در شکل ۶ نشان داده شده است. مقدار حداکثر پیش بینی شده برای این گونه نیز به خوبی با داده های تجربی اندازه گیری شده مطابقت دارد. در پایین دست راکتور غلظت مول O_2 هموار و یکنواخت شده است و به صورت تقریبی در همه جای محفظه احتراق ۳٪ بدست آمده است.



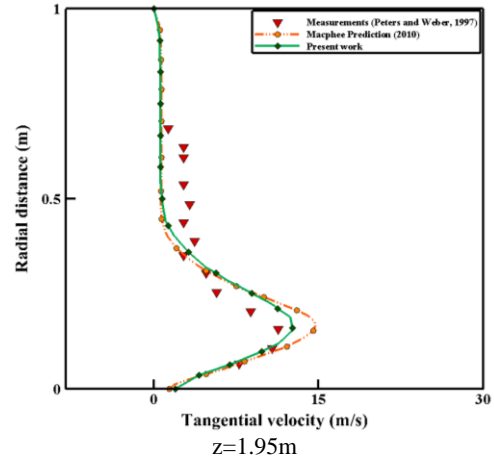
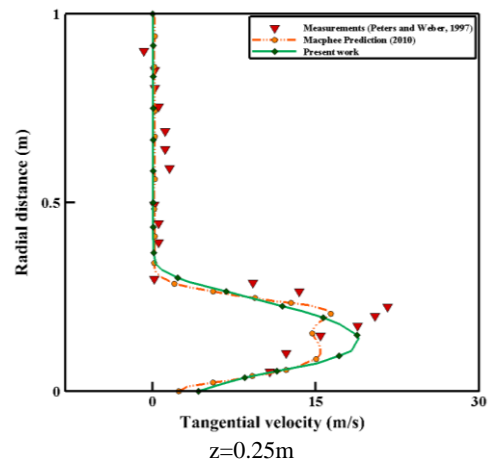
شکل ۳- اعتبارسنجی مدل با مقایسه پروفیل های دما در راستای فواصل شعاعی راکتور (K)

با کارهای مشابه وجود دارد. میانگین خطای نسبی بین داده های تجربی و نتایج حاصل از شبیه سازی انجام شده حدود ۴/۸ درصد است. تفاوت بین نتایج حاصل از شبیه سازی عددی و مقادیر تجربی برای غلظت های مولی گونه های O_2 و CO_2 به دلیل آنکه مقادیر آنها بسیار کوچک است، می توان نادیده گرفت. تفاوت های کوچک بین نتایج پیش بینی شده از شبیه سازی CFD و مقادیر تجربی می تواند ناشی از برخی فرضیات در نظر گرفته برای هندسه راکتور احتراق و پارامترهای هندسی مورد نیاز در شبیه سازی عددی باشد که در مقالات و کارهای مشابه انجام شده موجود نمی باشند. در جدول ۷ نتایج حاصل از شبیه سازی عددی با داده های آزمایشگاهی [۲۵] و مقاله مشابه دیگر [۲۴] در فاصله شعاعی ۰/۵m و راستای محوری ۱/۹۵m از ابتدای ورودی راکتور مقایسه شده است.

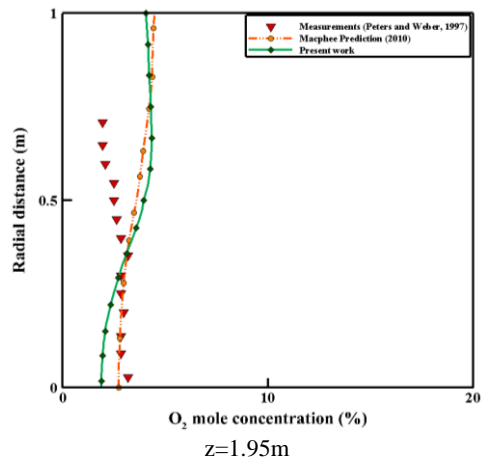
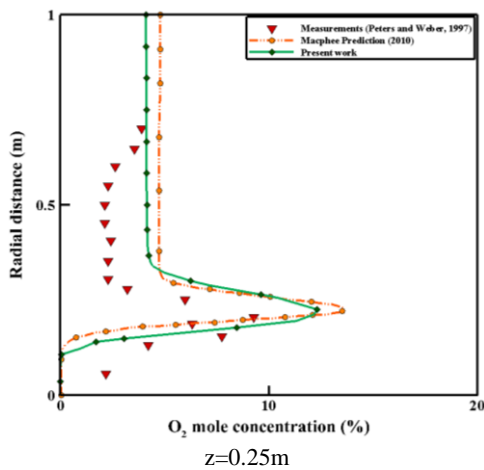
برای نشان دادن دقت نتایج پیش بینی شده به بهترین شکل، کانتورهای مربوطه در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، حداکثر دمای گاز در راکتور احتراق حدود ۱۸۰۰ K است. دو واکنش غالب در راکتور شامل دوی این واکنش ها گرمازا هستند. به دلیل واکنش احتراق سریع چار در محفظه احتراق، کسر مولی CO به سرعت افزایش می یابد. گونه CO تولید شده از طریق واکنش احتراق با اکسیژن موجود واکنش می دهد و CO_2 تولید می شود. انرژی مورد نیاز جهت انجام واکنش های دیگر که اغلب گرماگیر هستند توسط این دو واکنش و تحت شرایط اکسیداسیون کنترل شده ای تأمین می گردد. دما در راستای محور راکتور به دلیل ذات گرماگیر واکنش های دیگر به تدریج کاهش می یابد. نتایج به دست آمده نشان می دهند که حداکثر کسر مولی CO_2 در ناحیه ابتدایی راکتور است و در راستای طول محفظه مصرف می شود و از مقدار آن کاسته می شود. مقایسه پروفیل های رسم شده در شکل ۳ و شکل ۵ در فاصله $z = 0.25m$ ، که برای دما و غلظت گونه CO_2 است، نشان می دهد که مقدار دما و گونه CO_2 در نواحی نزدیک به مشعل به شدت افزایش یافته است. دلیل این افزایش دما، احتراق مواد فرار آزاد شده ناشی از فرایند تبخیر مواد فرار است. این مشخصه در کانتور دمایی داده شده در شکل ۷ تصدیق شده است. مشخصات دما در پایین دست راکتور احتراق به دلیل فرایند احتراق آهسته تر هموار شده



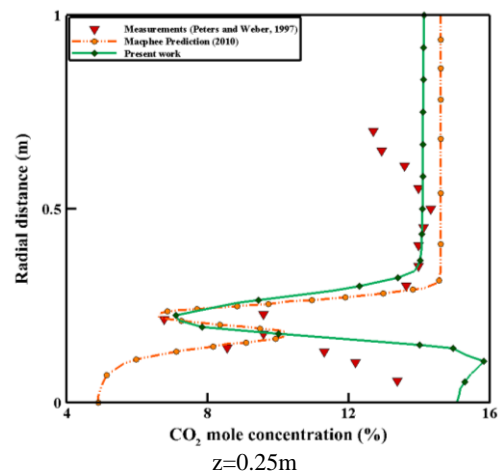
شکل ۵- اعتبارسنجی مدل با مقایسه پروفیل‌های غلظت مولی CO_2 در راستای فواصل شعاعی رآکتور



شکل ۴- اعتبارسنجی مدل با مقایسه پروفیل‌های سرعت مماسی ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) در راستای فواصل شعاعی رآکتور



شکل ۶- اعتبارسنجی مدل با مقایسه پروفیل‌های غلظت مولی O_2 در راستای فواصل شعاعی رآکتور

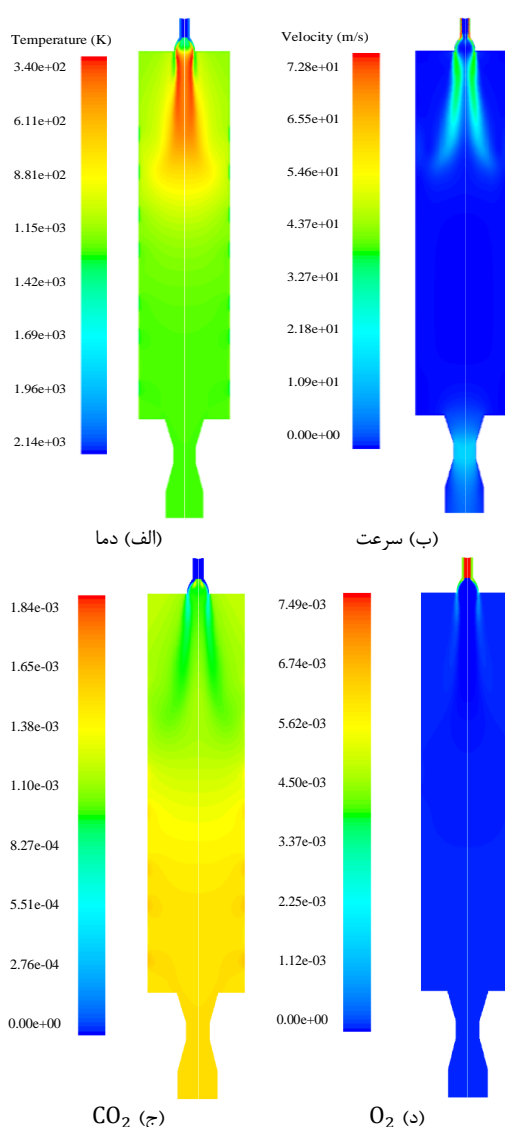


۳-۴- بررسی تأثیر مدل‌های مختلف تبخیر مواد فرار بر نتایج خروجی

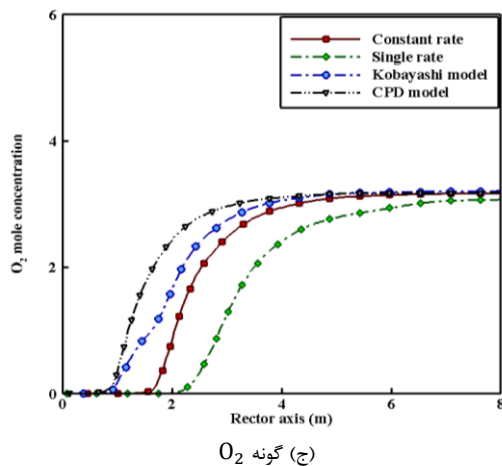
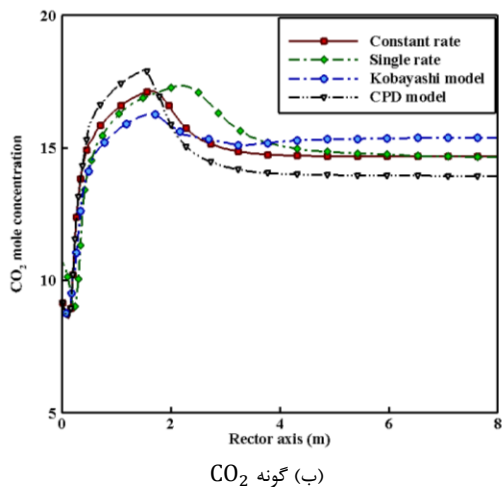
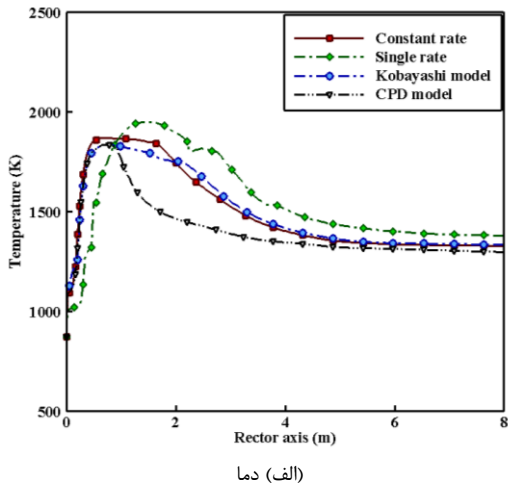
به صورت کلی، فرایند تبخیر مواد فرار پس از آنکه همه رطوبت موجود در ذرات زغال سنگ تبخیر گردید، آغاز می‌شود. همان‌طور که گفته شد، دقت نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی فرایند احتراق زغال سنگ به شدت تحت تأثیر زیرمدل‌های مختلف استفاده شده در شبیه‌سازی قرار دارد. هنگامی که مواد فرار از ذرات زغال سنگ آزاد می‌شوند، از طریق واکنش‌های شیمیایی به گازهای فرار تجزیه می‌شود. این بخش به مطالعه تأثیر مدل‌های مختلف تبخیر مواد فرار از زغال سنگ نمونه گاتل بورن hvBb بر نتایج خروجی از شبیه‌سازی عددی پرداخته شده است. چهار مدل تبخیر مواد فرار شامل مدل تک‌نرخ (Single rate)، مدل نرخ ثابت (Constant rate)، مدل نفوذ شیمیایی (CPD) و مدل کوبایاشی (حالت‌های اول تا چهارم) مورد مطالعه قرار گرفته است. شبیه‌سازی عددی برای هر مدل به صورت مجزا انجام شده و نتایج خروجی مورد بدست آمده است. در شکل ۸ روند تغییرات دما و گونه‌های گازی CO₂ و O₂ حین فرایند احتراق در مدل‌های مختلف فرایند تبخیر مواد فرار در راستای محور راکتور نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که روند تغییرات پیش‌بینی شده در همه مدل‌های مختلف، مشابه یکدیگر است و تنها بسته به دقت هر مدل، مقادیر پیش‌بینی شده تا حدودی با یکدیگر متفاوت می‌باشند. این تفاوت ناشی از پیش‌بینی متفاوت مواد فرار آزاد شده در هر مدل است. به‌عنوان مثال مدل نرخ محدود مقدار دمای حداکثر را در نقطه اشتعال راکتور و نیز در خروجی محفظه بیشترین مقدار و مقدار گونه O₂ را نسبت به دیگر مدل‌ها، کمترین مقدار پیش‌بینی کرده است. مقادیر دمای پیش‌بینی شده توسط مدل نفوذ شیمیایی پایین‌تر از دیگر مدل‌ها بدست آمده است و مقدار CO₂ پیش‌بینی شده توسط این روش در خروجی راکتور نیز نسبت به دیگر روش‌ها کمتر پیش‌بینی شده است. همان‌طور که از مجموعه نمودارهای به‌دست‌آمده برای دما و غلظت گونه‌های گازی به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود، در همه مدل‌ها پس از اتمام فرایند تبخیر مواد فرار از ذرات سوخت تزریق شده که در نیمه ابتدایی محفظه رخ می‌دهد، دما و غلظت مولی گونه‌ها در راستای محور راکتور تغییرات ناچیزی دارند. فرایند تبخیر مواد فرار، فرایندی بسیار سریع است که موقعیت شعله در راستای محور مرکزی

جدول ۷- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی [۲۰] و مقاله مشابه دیگر [۱۹] در فاصله شعاعی ۰/۵m و راستای محوری ۱/۹۵m از ابتدای ورودی راکتور

مقاله مشابه [۱۹]	مقدار آزمایشگاهی [۲۰]	نتایج شبیه‌سازی	پارامتر مورد مطالعه
۱۷۹۰	۱۶۳۵	۱۶۴۰	دما (K)
۰/۶	۱/۲	۰/۹	سرعت مماسی (m/s)
۱۶	۱۳/۸	۱۴/۱	غلظت مولی CO ₂
۳/۶	۳/۱	۳/۸	غلظت مولی O ₂



شکل ۷- کانتورهای (الف) دما، (ب) سرعت، (ج) غلظت مولی CO₂، (د) غلظت مولی O₂ در صفحه وسط راکتور



شکل ۸- مطالعه تاثیر مدل‌های مختلف تبخیر مواد فرار شامل مدل تک‌نرخ، مدل نرخ ثابت، مدل کوبایاشی و مدل نفوذ شیمیایی بر توزیع کسر مولی گونه‌های CO₂ و O₂ در راستای محور مرکزی راکتور احتراق

محفظه احتراق را می‌توان توسط این فرایند مشخص نمود. در نزدیکی ورودی سوخت و هوا به درون راکتور، دما نسبت به دیگر نواحی محفظه پایین‌تر است. دلیل آن ناشی از انجام فرایند تبخیر مواد فرار که فرایندی گرماگیر است، در این ناحیه است. پس از آن، واکنش‌های سریع گرمازا شامل $CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$ و $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ اتفاق می‌افتد که منجر به افزایش ناگهانی دمای گاز درون راکتور احتراق و نیز غلظت مولی گونه CO₂ می‌شود. پس از آن، دما در راستای محور مرکزی راکتور به دلیل انجام واکنش‌های گرماگیر از جمله $CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$ و $C(s) + CO_2 \rightarrow 2CO$ می‌یابد که گرمایش مورد نیاز این فرایندها توسط واکنش‌های انجام شده در ناحیه احتراق تامین می‌شود. در نیمه دوم راکتور دما و غلظت‌های مولی گونه‌های مورد مطالعه تقریباً ثابت باقی مانده است که به دلیل تعادل بین واکنش‌های گرمازا و گرماگیر در این ناحیه می‌شود.

با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۸ می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه تفاوت‌های اندکی در نتایج به‌دست‌آمده از دو حالت مورد بررسی در راستای محور راکتور مشاهده می‌شود، اما روند کلی تغییرات دما و گونه‌های گازی تولید شده از یک روند کلی تبعیت می‌کنند. پروفیل دمایی و همچنین توزیع گونه‌های تولید شده در دو حالت مدل نرخ ثابت و مدل کوبایاشی بسیار مشابه هستند. با این حال تفاوت‌های اندکی بین پروفیل‌ها در راستای محور راکتور وجود دارد که ناشی از نرخ‌های متفاوت واکنش‌ها است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که فرایند تبخیر مواد فرار در مدل CPD دیرتر از سایر مدل‌ها شروع می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، واکنش‌های تبخیر مواد فرار در مدل CPD در مقایسه با سایر مدل‌ها با تاخیر شروع می‌شوند.

۴-۴- مطالعه تأثیر سایز ذرات زغال سنگ

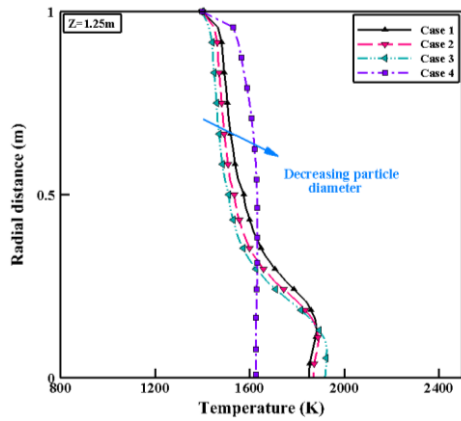
به دلیل الزامات خاص راکتورهای احتراق ورود همزمان جهت تزریق سوخت زغال سنگ به صورت پودر شده، ممکن است پس از فرایند آسیاب کردن طیف وسیعی از توزیع اندازه ذرات زغال سنگ در دسترس باشد. به منظور درک صحیح تأثیر اندازه ذرات زغال سنگ بر عملکرد راکتور احتراق ورود همزمان، چهار اندازه مختلف ذرات سوخت زغال سنگ جهت این بررسی انتخاب شده‌اند. این چهار اندازه با نام‌های حالت ۱ (Case 1)، حالت ۲ (Case 2)، حالت ۳ (Case 3) و حالت چهار (Case 4) با میانگین قطر جرمی ذرات به ترتیب ۵۵، ۸۵ و ۱۲۰ و ۳۰ میکرومتر مطابق با جدول ۸ دسته‌بندی شده‌اند. پارامترهای دیگر در این سه حالت مورد مطالعه ثابت نگه داشته شده‌اند. در شرایط عملکردی واقعی، توزیع اندازه ذرات یکنواخت نیستند؛ بنابراین، توابع توزیع روزین-رملر جهت نزدیک کردن شبیه‌سازی به شرایط واقعی اعمال شده است.

جدول ۸- توزیع اندازه ذرات مختلف سوخت

پارامترها	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴
توزیع	۱۵۰٪ ۱۰٪	۱۵۰٪ ۱۰٪	۱۵۰٪ ۲۰٪	۱۵۰٪ ۱۰٪
اندازه	۱۲۰٪ ۱۰٪	۱۳۰٪ ۲۰٪	۱۴۰٪ ۲۰٪	۹۰٪ ۱۰٪
ذرات	۸۰٪ ۲۰٪	۹۰٪ ۲۲٪	۱۱۰٪ ۲۵٪	۴۰٪ ۸٪
(μm):	۴۰٪ ۲۰٪	۷۰٪ ۲۴٪	۷۹٪ ۳۰٪	۳۰٪ ۶٪
%	۱۰٪ ۲۰٪	۱۸٪ ۱۰٪	۳۰٪ ۲۰٪	۱۵٪ ۵٪
قطر متوسط ذرات (μm)	۵۵	۸۵	۱۲۰	۳۰

دما و پروفیل غلظت گونه‌های گازی CO_2 و O_2 پیش‌بینی شده در فواصل شعاعی مختلف در راستای محور راکتور احتراق در شکل ۹، شکل ۱۰ و شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند. همانطور که از این نمودارها مشاهده می‌شود، مشخصات احتراق به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر اندازه ذرات زغال سنگ تزریق شده به درون راکتور قرار دارند. از مقایسه نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که میزان واکنش پذیری ذرات زغال سنگ با کاهش اندازه ذرات بهبود می‌یابد. در شکل ۹ (الف - د)، روند تغییرات دما در راستای شعاعی و فواصل محوری مختلف از ورودی

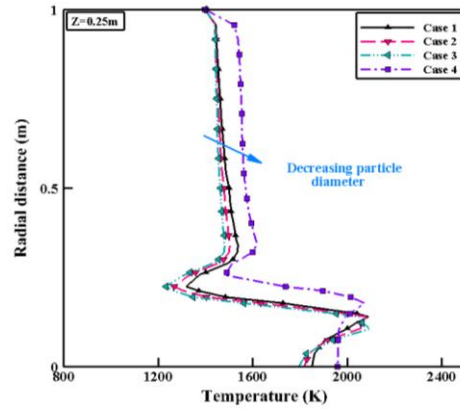
راکتور احتراق با اندازه ذرات زغال سنگ در چهار حالت قابل بررسی است. شکل ۱۰ و شکل ۱۱ نیز روند تغییرات دوگانه اصلی فرایند احتراق، به ترتیب CO_2 و O_2 را در فواصل شعاعی مشخص در راستای محور محفظه نشان می‌دهند. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی CFD نشان می‌دهند که افزایش اندازه ذرات زغال سنگ از ۵۵ تا ۱۲۰ میکرومتر، منجر به کاهش دما و غلظت مولی گونه‌ها در راستای شعاعی محفظه احتراق برای حالت‌های ۱ تا ۳ شده است. این نتیجه‌گیری با کار انجام شده توسط چن و همکاران [۴۳] نیز مطابقت دارد. از بررسی پروفیل‌های دمایی و گونه‌های بدست آمده مشاهده می‌شود که تغییرات شدیدتری در حالت کاهش میانگین اندازه ذرات زغال سنگ از $55\mu\text{m}$ به $30\mu\text{m}$ رخ داده است. توزیع دما در راستای شعاعی راکتور احتراق نمایانگر یک افزایش دما برای حالت ۴ نسبت به دیگر حالت‌ها پیش‌بینی شده است. این روند افزایشی در شکل ۱۰ برای غلظت مولی گونه CO_2 نیز به صورت مشابه تکرار شده است، درحالی‌که روند برعکس برای غلظت مولی گونه O_2 پیش‌بینی شده است (شکل ۱۱). این تغییرات به ویژه در نواحی نزدیک به خروجی راکتور احتراق بیشتر می‌شود. ذرات زغال سنگ با ابعاد کوچک‌تر دارای مساحت سطح ویژه بالاتری نسبت به ذرات بزرگ‌تر می‌باشند. مساحت سطح ویژه یک ماده جامد به‌عنوان ویژگی از آن ماده تعریف می‌شود که بیانگر میزان مساحت کل سطح ماده بر واحد جرم و یا بر واحد حجم است. بزرگ‌تر بودن مساحت سطح ویژه ذرات کوچک‌تر سبب می‌شود، فرایند اکسیداسیون این ذرات افزایش یابد و این به معنای آن است که ذرات زغال سنگ با ابعاد کوچک‌تر راحت‌تر می‌سوزند. بالاتر بودن نسبت سطح به حجم ذرات زغال سنگ کوچک‌تر، سبب می‌شود این ذرات کوچک‌تر حین فرایند احتراق سریع‌تر گرم شوند و این به معنای آن است که فرایند تبخیر مواد فرار تسریع می‌گردد؛ در نتیجه، حین فرایند عملیات حرارتی برای ذرات بزرگ‌تر، ممکن است برخی ذرات ناشی از کمتر بودن و یا مؤثر نبودن انتقال حرارت منتقل شده به آن‌ها، بدون هیچ‌گونه واکنشی در طول محفظه جریان بمانند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که رابطه معکوسی بین مؤثر بودن فرایند احتراق و اندازه ذرات زغال سنگ وجود دارد. مقایسه پروفیل‌های دمایی بدست آمده در شکل ۹ نشان می‌دهد که کاهش اندازه ذرات زغال سنگ، منجر به واکنش-پذیری سریع‌تر ذرات شده است و دلیل بیشتر بودن دمای گاز



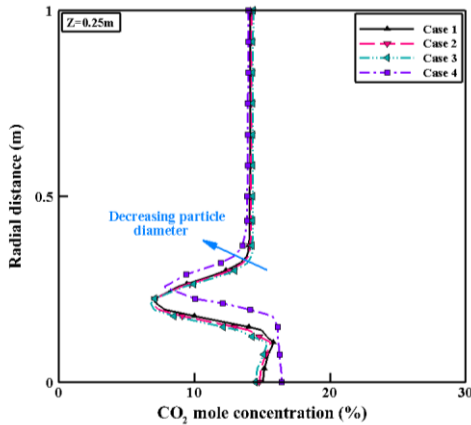
د) Z=1.25

شکل ۹- توزیع دمایی در راستای فواصل شعاعی رآکتور احتراق به منظور بررسی سایزهای مختلف اندازه ذرات زغال سنگ در چهار حالت شامل حالت اول (Case 1=۵۵ μm)، حالت دوم (Case 2=۸۵ μm)، حالت سوم (Case 3=۱۲۰ μm) و حالت چهارم (Case 4=۳۰ μm)

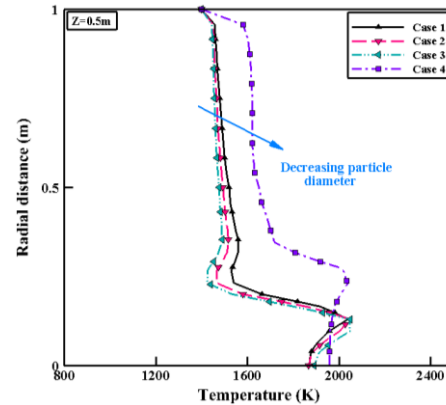
درون رآکتور در ابتدای محفظه در Case 4، احتراق سریعتر این ذرات نسبت به سایر حالتها است. با حرکت ذرات به سمت انتهای رآکتور، میزان تغییرات دما در راستای شعاعی کاهش یافته است به نحوی که در شکل ۹ (د)، دما تقریباً یکنواخت شده است. این روند تغییرات برای گونه‌های CO_2 و O_2 نیز به صورت مشابه تکرار شده است.



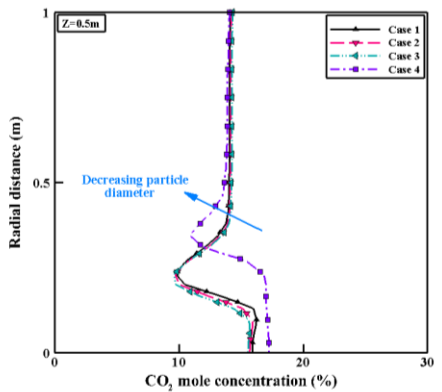
الف) Z=0.25



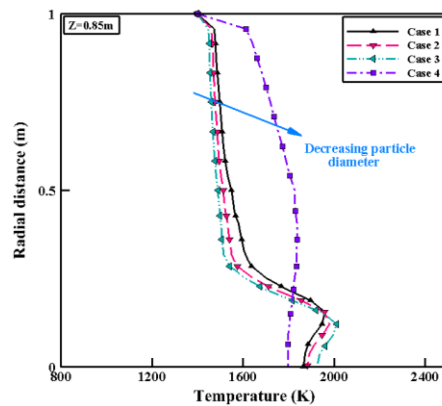
الف) Z=0.25



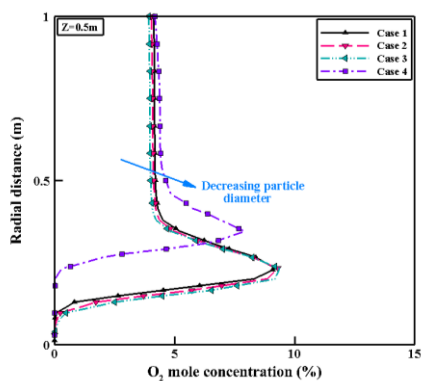
ب) Z=0.5



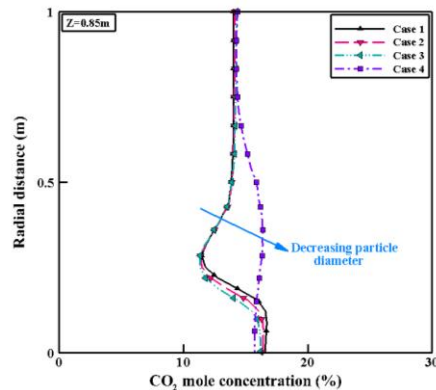
ب) Z=0.5



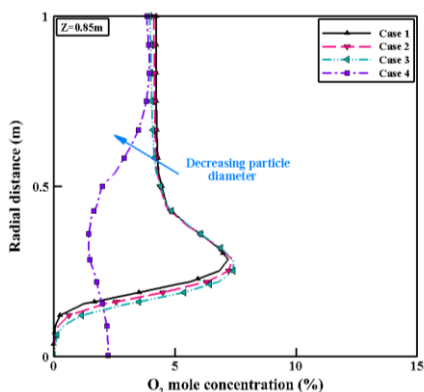
ج) Z=0.85



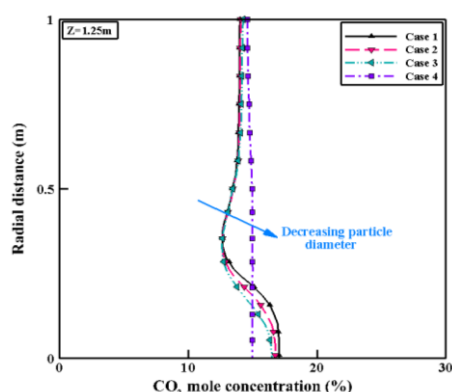
Z=0.5 (ب)



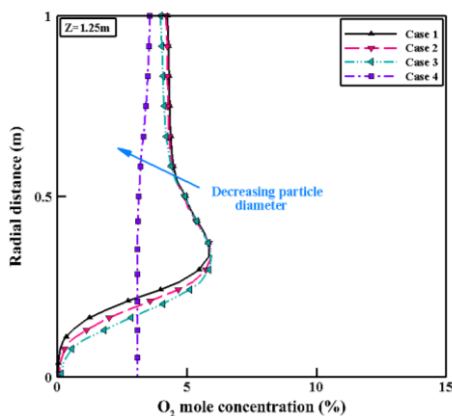
Z=0.85 (ج)



Z=0.85 (ج)



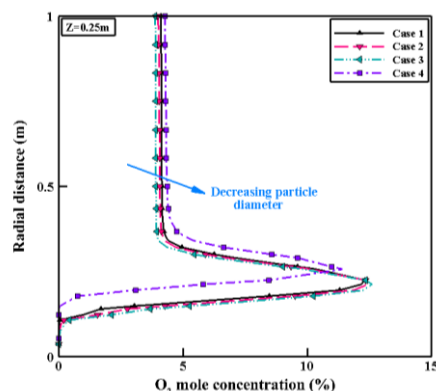
Z=1.25 (د)



Z=1.25 (د)

شکل ۱۰- توزیع غلظت مولی گونه CO_2 در راستای فواصل شعاعی راکتور احتراق به منظور بررسی سایزهای مختلف اندازه ذرات زغال سنگ در چهار حالت شامل حالت اول ($Case 1=55\mu m$)، حالت دوم ($Case 2=85\mu m$)، حالت سوم ($Case 3=120\mu m$) و حالت چهارم ($Case 4=30\mu m$)

شکل ۱۱- توزیع غلظت مولی گونه O_2 در راستای فواصل شعاعی راکتور احتراق به منظور بررسی سایزهای مختلف اندازه ذرات زغال سنگ در چهار حالت شامل حالت اول ($Case 1=55\mu m$)، حالت دوم ($Case 2=85\mu m$)، حالت سوم ($Case 3=120\mu m$) و حالت چهارم ($Case 4=30\mu m$)



Z=0.25 (الف)

۵- نتیجه گیری

جهان در وضعیت کنونی در میانه یک بحران انرژی قرار دارد. افزایش تقاضای مصرف انرژی، بالا رفتن قیمت حامل‌های انرژی و نگرانی‌های زیست‌محیطی منجر به فشارهای شدیدی به اقتصاد کشورهای مختلف شده‌است. استفاده از زغال‌سنگ به عنوان یکی از منابع مهم تامین انرژی در سیستم‌های احتراق با مقیاس صنعتی، گامی مهم در جهت تأمین بخشی از انرژی جهان است. هدف از این مطالعه، استفاده از ابزار CFD به منظور درک فرایندهای احتراق درون رآکتور نمونه ورود هم‌زمان است. یک نمونه رآکتور احتراق ورود هم‌زمان دما بالا در مقیاس صنعتی مورد مطالعه قرار گرفت. رآکتور احتراق صنعتی از نمونه تک‌مرحله‌ای و با نام IFRI مشهور است. در ابتدا رآکتور به صورت سه بعدی و با پیاده‌سازی تقریباً همه زیرمدل‌های مربوطه که درون محفظه احتراق انجام می‌شود، با سوخت زغال‌سنگ پودر شده مدل‌سازی و شبیه‌سازی گردید. در این مطالعه هفت واکنش مختلف شامل ۳ واکنش ناهمگن (گاز-ذره) و ۴ واکنش همگن (گاز-گاز) در نظر گرفته شد. سینتیک واکنش‌ها با استفاده از مقالات موجود استخراج شد و پارامترهای عملکردی مشابه با حالت واقعیت در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی و دیگر کارهای مشابه موجود مقایسه شد. کانتورهای مختلف مانند دما، سرعت و غلظت‌های مولی گونه‌ها در همه فضای درون رآکتور ارائه گردید. تأثیر زیرمدل‌های مختلف ارائه شده برای تبخیر مواد فرار از سوخت بر نتایج خروجی از شبیه‌سازی عددی بررسی گردید و تفاوت نتایج پیش‌بینی شده در مدل‌های متفاوت مورد بحث و بررسی قرار گرفت. تأثیر سایزهای مختلف توزیع ذرات زغال سنگ بررسی گردید. مطالعه تأثیر زیرمدل‌های مختلف مواد فرار آزاد شده از سوخت زغال‌سنگ نشان داد که مدل کوبایاشی، اگرچه نسبت به دیگر مدل‌ها دارای زمان محاسباتی بالاتری بود، اما جواب‌های دقیق‌تری به نتایج تجربی برای رآکتور ارائه داد. نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش اندازه ذرات سوخت از ۵۵ به ۱۲۰ میکرومتر منجر به کاهش دمای گاز درون محفظه گردید. کاهش اندازه ذرات از ۵۵ به ۳۰ میکرومتر، بر مشخصات خروجی دمایی و گونه‌های CO₂ و O₂ قابل ملاحظه است. نتایج این مطالعه می‌تواند به عنوان نقشه راهی جهت پیش‌بینی درک فرایند احتراق و پدیده‌های درون رآکتور جهت استفاده از انواع مختلف سوخت جامد باشد و

عملکرد رآکتور احتراق را بدون انجام هزینه‌های زیاد و طولانی پیش‌بینی نماید.

مراجع

- [1] B. S. R. o. W. E. V (2022) Smil. Energy Transitions: Global and National Perspectives, Appendix A.
- [2] B. reports. BP reports: The Energy Roadmap - Setting the Direction for 21st Century Energy, (2021) <http://www.bp.com>.
- [3] E. P. Agency Bituminous And Subbituminous Coal Combustion, EPA, (2021) www.epa.gov.
- [4] S. Shoeibi, M. Saemian, M. Khiadani, H. Kargarsharifabad, S. Ali Agha Mirjalily, Energy Convers. Manag., (2023), 276, 116504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116504>
- [5] R. Dhivagar, S. Shoeibi, H. Kargarsharifabad, M. H. Ahmadi, M. Sharifpur, Energy Sci. Eng., (2022), 10 (8), 3154-3166 .
- [6] S. Khanmohammadi, K. Atashkari, R. Kouhikamali (2016) Int. J. Chem. Eng .
- [۷] م. برجی بدایغی، ک. آتشکاری، ص. قربانی، ن. نریمان زاده، (۲۰۱۷) مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، ۷ (۱)، ۱۱۳-۱۳۳. DOI: 10.22044/jsfm.2017.940
- [8] P. V. Danckwerts (1995) Chem. Eng. Sci., 50 (24), 3857-3866 .
- [9] Y. Li, L. Yan, B. Yang, W. Gao, M. R. Farahani (2018) Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 40 (5), 544-548 .
- [10] A Comparative Study of Euler-Euler and Euler-Lagrange Modelling of Wood Gasification in a Dense Fluidized Bed, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [11] T. M. Ismail, M. A. El-Salam, E. Monteiro, A. Rouboa (2016) Appl. Therm. Eng., 106, 1391-1402 .
- [12] E. Monteiro, T. M. Ismail, A. Ramos, M. A. El-Salam, P. Brito, A. Rouboa (2017) Appl. Therm. Eng, 123, 448-457 .
- [13] Y. C. Choi, X. Y. Li, T. J. Park, J. Kim, J. Lee, Fuel, (2001), 80 (15), 2193-2201 .
- [14] X. Ku, T. Li, T. Løvås (2014) Energy & Fuels, 28 (8), 5184-5196. DOI: 10.1021/ef5010557
- [15] S. Park, H. Jeong, J. Hwang (2015) Energies, 8 (5), 4216-4236.

- [34] A. Vuokila;, O. Mattila;, R. L. Keiski;, E. Muurinen;(2016) International Flame Research Foundation, 1-16 .
- [35] A. Labbafan, H. Ghassemi (2016) Energy Convers. Manag., 2016, 112, 337-349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.040>
- [36] H. Watanabe, M. Otaka, Fuel (2006, 85 (12), 1935-1943. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.02.002>
- [37] M. Vascellari, S. Schulze, P. Nikrityuk, D. Safronov, C. Hasse, Flow, Flow Turbul. Combust., 2014, 92 (1), 319-345. DOI: 10.1007/s10494-013-9467-7
- [38] M. M. Baum, P. J. Street, Combust. Sci. Technol., 1971, 3 (5), 231-243. DOI: 10.1080/00102207108952290
- [39] J. Khan, T. Wang, IJCCE, 2013, Vol.02No.03, 19. DOI: 10.4236/ijcce.2013.23005.
- [40] K. K. Pillai, JIE, 1981, 54, 142-150 .
- [41] J. M. Jones, A. R. Lea-Langton, L. Ma, M. Pourkashanian, A. Williams (2014) Pollutants Generated by the Combustion of Solid Biomass Fuels, Springer.
- [42] T. Fletcher, A. Kerstein, R. Pugmire, M. Solum, D. Grant (1992) A chemical percolation model for coal devolatilization: Milestone report, Sandia National Labs., Livermore, CA (United States).
- [43] R. S. Jupudi, V. Zamansky, T. H. Fletcher, Energy & Fuels, 2009, 23 (6), 303067-63 .DOI: 10.1021/ef9001346
- [44] A. Silaen, T. Wang, Int. J. Heat Mass Transf.(2010), 53 (9), 2074-2091. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.12.047>
- [45] M. Saha, A. Chinnici, B. B. Dally, P. R. Medwell, (2015) Energy & Fuels, 29 (11), 7650-7669. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5b01644
- [46] H. Kobayashi, J. B. Howard, A. F. Sarofim, Symposium (International) on Combustion (1977), 16 (1), 411-425. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(77\)80341-X](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80341-X)
- [47] C. Chen, M. Horio, T. Kojima (2000) Chem. Eng. Sci., 55 (18), 3875-3883. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00031-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00031-2)
- [16] H. J. Jeong, D. K. Seo, J. Hwang (2014) Appl. Energy, 123, 29-36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.026>
- [۱۷] ا. رحمتی, ب. آقائی, مجله مهندسی مکانیک, ۲۰۲۰, ۲۹ (۴), ۱۶-۱۱
- [18] Q. Wang ,E. Wang, O. P. Chionoso (2022) Energy, 238, 121722 .
- [19] A. Hosseini, J. L. T. Hage, K. Meijer, E. Offerman, Y. Yang (2023) Processes, 11 (3), 839 .
- [20] Z. Yuan, Z. Chen, L. Bian, X. Wu, B. Zhang, J. Li, Y. Qiao, Z. Li (2023) Energy, 275, 127418. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127418>
- [۲۱] ع. بهاری, ک. آتشکاری, ج. م. مهر, Modares Mechanical Engineering, (2018), 18 (۶)
- [22] J. Macphee, University of Canterbury Christchurch, New Zealand 2010.
- [23] A. A. F. Peters, R. Weber (1997) CST J , 122 (1-6), 131-182. DOI: 10.1080/00102209708935608
- [24] U. S. D. o. Energy (2007) Energy Tips – Process Heating, U.S. Department of Energy.
- [25] J. Liu, S. Chen, Z. Liu, K. Peng, N. Zhou, X. Huang, T. Zhang, C. Zheng (2012) Ind. Eng. Chem. Res, 51 (2), 691-703 .
- [26] Ansys-Fluent, Research Mechanical, Help System, ANSYS, Inc., Coupled Field Analysis Guide.
- [27] M. Kumar, A. F. Ghoniem (2012) Energy & Fuels, 26 (1), 464-479. DOI: 10.1021/ef2008858
- [28] C. T. Crowe, M. P. Sharma, D. E. Stock (1997) J. Fluids Eng., 99 (2), 325-332. DOI: 10.1115/1.3448756
- [29] W.-H. Chen, C.-J. Chen, C.-I. Hung, C.-H. Shen, H.-W. Hsu (2013) Appl. Energy, 112, 421-430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.034>
- [30] X. Lu, T. Wang, Fuel (2013), 108, 620-628. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.02.024>
- [31] Z. Y. Feng, Z. Liu, X. Fang, F. H. Zhang, B. Z. Peng, Z. J. Gong (2016) Modeling of Cold Flow Field in an Entrained-Flow Gasifier with Single or Multiple Injectors.
- [32] C. Yin, L. A. Rosendahl, S. K. Kær, Fuel (2011), 90 (7), 2519-2529. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.03.023>
- [33] M. A. Yazdanpanah Jahromi, K. Atashkari, M. Kalteh (2019) Int. J. Energy Res .