

شبیه‌سازی عددی احتراق پودر زغال در یک محفظه احتراق استوانه‌ای

احمدرضا رحمتی^{۱*}، بهروز آقائی^۲

^۱ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه کاشان

^۲ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه کاشان

*مسئول مکاتبات: ar_rahmati@kashanu.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

احتراق اتلاف ادی
پودر زغال
انتقال حرارت تشعشی
محفظة احتراق استوانه‌ای
شبیه‌سازی عددی

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۶

در کار حاضر به بررسی عددی احتراق پودر زغال در یک محفظه احتراق استوانه‌ای و تحلیل پارامترهای عملکرد آن در شرایط پایا و در حضور انتقال حرارت تشعشی پرداخته شده است. استفاده از سوخت‌های کمکی مانند پودر زغال و غیره در محفظه‌های احتراق به منظور افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌های تولید و بالا بردن راندمان در اکثر نقاط دنیا استفاده می‌شود. پارامترهای عملکرد شامل درصد اکسیژن موجود در هوای دم (هوا با دما و فشار بالا) از ۳۵ - ۲۱ درصد، دمای هوای دم از ۱۴۰۰ - ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و دبی جرمی پودر زغال از ۰/۱ - ۰/۱ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد که اثر آن روی دما و سرعت در خروجی محفظه احتراق بررسی شده است. مدل احتراق مورد استفاده، مدل احتراق اتلاف ادی می‌باشد، رژیم جریان مغشوش و مدل موردنظر $k - \epsilon$ استاندارد انتخاب گردیده است. همچنین برای شبیه‌سازی انتقال حرارت تشعشی ناشی از گازهای داغ از مدل DO استفاده شده است. نتایج به صورت خطوط هم‌دما، کانترهای سرعت و نمودار تغییرات دما و سرعت در خروجی محفظه احتراق ارائه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش اکسیژن موجود در هوای دم و دمای هوای دم سبب افزایش دما و سرعت در خروجی محفظه احتراق می‌گردد و افزایش دبی جرمی پودر زغال کاهش دما و افزایش سرعت در خروجی را نتیجه می‌دهد.

۱ مقدمه

کمتر، خروجی بیشتر گاز را به همراه دارد. کاسترو و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۳ احتراق همزمان پودر زغال و پودر زغال چوب را با استفاده از روش حجم محدود به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که ترکیب دو سوخت همراه با افزایش اکسیژن، تولید کوره‌بلند را تا ۲۵ درصد افزایش می‌دهد. سانتوس و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۴ عملکرد چهار نوع ورودی پودر زغال را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در کار خود از ورودی‌های تکی، دوگانه، چرخشی با فاکتور چرخش ۰/۱۲ و ۰/۲۴ استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که تزریق پودر زغال با ورودی چرخشی با فاکتور چرخش ۰/۲۴ به دلیل پخش بیشتر ذرات و تماس با اکسیژن، راندمان احتراق را بالا می‌برد. ژائو و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۵ احتراق پودر زغال در دهانه لوله دمش کوره‌بلند را به صورت آزمایشگاهی مطالعه نمودند و تأثیر الگوهای تزریق متفاوت پودر زغال را بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از ورودی تکی زغال و تکی اکسیژن برای تزریق مناسب نیست زیرا افزایش کم نسبت احتراق، سطح پایین استفاده از اکسیژن و احتمال خرابی دهانه لوله دمش را به همراه دارد. شن و یو [۷] در سال ۲۰۱۶ احتراق ترکیب سه نوع پودر زغال را در حالت سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هنگام ترکیب سه نوع زغال با یکدیگر نسبت احتراق در مقایسه با زغال‌های تکی افزایش می‌یابد.

در کار حاضر پارامترهای عملکرد احتراق پودر زغال شامل درصد اکسیژن در هوای دم، دمای هوای دم و دبی جرمی پودر زغال در محفظه

در دنیای امروز کاهش مصرف انرژی و افزایش راندمان تولید همراه با حفظ محیط زیست یکی از دغدغه‌های اصلی تولیدکنندگان می‌باشد. تزریق پودر زغال در محفظه‌های احتراق یکی از روش‌های کاهش مصرف انرژی و افزایش تولید نسبت به سایر سوخت‌ها (کک در صنایع فولادسازی)، در کنار بهبود شرایط زیست‌محیطی می‌باشد [۱]. تزریق پودر زغال در صنایع فولادسازی برای اولین بار در سال ۱۸۵۰ در دو کشور فرانسه و بلژیک گزارش شد که در آن زمان زغال تزریق شده تا ۱۰ درصد از کل سوخت مورد نیاز کوره‌بلند را فراهم می‌آورد. از اواخر سال ۱۹۵۰ و اوایل ۱۹۶۰ علاوه بر تزریق پودر زغال، تزریق نفت و گاز طبیعی نیز به منظور بهبود راندمان کوره‌بلند انجام پذیرفت و یک المان مهم در کنترل‌پذیری کوره‌بلند شکل گرفت. به هر حال با بحران نفت در سال ۱۹۷۰ تزریق پودر زغال افزایش یافت [۲]. مزایای استفاده از این سوخت در صنعت فولادسازی عبارتند از: کاهش مصرف کک گران قیمت در کوره‌بلند، کاهش مصرف انرژی در کک‌سازی، کاهش پخش ذرات و مواد آلاینده در جو، در دسترس بودن زغال و نهایتاً کاهش هزینه‌های تولید فولاد. در زمینه احتراق پودر زغال مطالعات زیادی انجام گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. شن و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۲ احتراق پودر زغال را برای کوره‌بلندی در استرالیا شبیه‌سازی کردند. آن‌ها محفظه احتراق را به چهار ناحیه با ضرایب تخلخل متفاوت تقسیم نمودند. نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که ناحیه با ضریب تخلخل

احتراق استوانه‌ای با مقطع متفاوت در شرایط پایا با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت بررسی شده است. درصدهای اکسیژن مورد مطالعه بین ۳۵ - ۲۱ درصد می‌باشد. دمای هوای دم نیز از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد آغاز و نهایتاً به ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. همچنین دبی جرمی پودر زغال از ۰/۱ تا ۰/۱ کیلوگرم بر ثانیه متغیر است. با استفاده از نتایج این شبیه‌سازی عددی می‌توان مقدار افزایش یا کاهش پارامترهای مورد بررسی را بر اثر تغییر هر یک از پارامترهای عملکرد مذکور به دست آورد و با استفاده از تعمیم آن در مقیاس‌های صنعتی بتوان گامی در جهت بهبود صنعت فولادسازی داخلی برداشت.

۳ معادلات حاکم

معادلات حاکم برای گاز در روابط (۱) تا (۶) آورده شده است [۳]. این معادلات به ترتیب شامل معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی، انرژی جنبشی، انرژی، نرخ اتلاف آشفستگی و نمونه‌های جرمی گاز می‌باشد.

$$\nabla \cdot (\rho U) = \sum \dot{m} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho U U) - \nabla \cdot ((\mu + \mu_t)(\nabla U + (\nabla U)^T)) = -\nabla(p + \frac{2}{3}\rho k) + \sum f_D \quad (2)$$

$$\nabla \cdot [\rho U H - (\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_H})\nabla H] = \sum \dot{q} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot [\rho U k - (\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\nabla k] = (p_k - \rho \epsilon) \quad (4)$$

$$\nabla \cdot [\rho U \epsilon - (\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon})\nabla \epsilon] = \frac{\epsilon}{k}(C_1 p_k - C_2 \rho \epsilon) \quad (5)$$

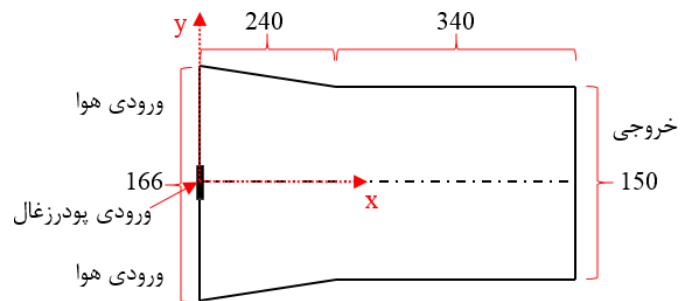
$$\nabla \cdot [\rho U Y_i - (\Gamma_i + \frac{\mu_t}{\sigma_{Y_i}})\nabla Y_i] = \dot{W}_i \quad (6)$$

که U سرعت میانگین گاز، \dot{m} نرخ انتقال جرم از ذرات، μ ضریب لزجت دینامیکی، μ_t ضریب لزجت جریان آشفته، p فشار، f_D نیروی درگ ناشی از ذرات، H آنتالپی، λ ضریب هدایت گرمایی، C_p ظرفیت گرمایی ویژه، σ_H عدد پراختل مدل آشفته، \dot{q} نرخ انتقال حرارت از ذرات، σ_k عدد پراختل انرژی جنبشی آشفته، p_k تولید آشفستگی ناشی از نیروهای لزج، σ_ϵ عدد پراختل نرخ اتلاف آشفستگی، C_1 و C_2 ثوابت جریان آشفته، Γ_i پخش مولکولی نمونه جرمی i ام، σ_{Y_i} ثابت جریان آشفته و \dot{W}_i نرخ واکنش نمونه جرمی بر واحد حجم برای نمونه جرمی i ام می‌باشند. در مدل احتراق اتلاف ادی کسر جرمی نمونه‌های جرمی پیش‌بینی می‌شود. برای استفاده از این روش باید مدل‌های برهم‌کنش آشفستگی-شیمی را انتخاب نمود. برهم‌کنش آشفستگی-شیمی نرخ واکنشی است که به صورت عبارت چشمه در معادله انتقال نمونه‌های جرمی ظاهر می‌شود و به مدل‌های نرخ محدود آرام، نرخ محدود اتلاف ادی، احتراق اتلاف ادی و مدل احتراق مفهوم اتلاف ادی طبقه‌بندی می‌شود. در مدل احتراق اتلاف ادی فقط نرخ اختلاط محاسبه شده و از محاسبات سنگین سینتیک شیمیایی آرنیوس چشم‌پوشی می‌شود. در این مدل نرخ واکنش به وسیله اختلاط آشفستگی کنترل می‌شود و اثر نوسانات آشفستگی نادیده گرفته می‌شود. معادلات $k - \epsilon$ دارای ضرایب تجربی هستند که مقدار آن‌ها بر اساس نتایج تجربی معتبر به دست خواهد آمد، گرچه می‌توان ضرایب محاسبه شده را برای رسیدن به جواب‌هایی که با نتایج تجربی تطابق بیشتری داشته باشند تغییر داد. ثوابت جریان آشفته به‌کاررفته در این شبیه‌سازی بر اساس

هندسه و ابعاد آن بر حسب میلی‌متر در شکل ۱ آورده شده است.

۲ هندسه مسئله

هندسه و ابعاد آن بر حسب میلی‌متر در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱: هندسه کار حاضر.

در ورودی هوای دم با دبی جرمی ۹۶۱۱ متر مکعب بر ساعت و دمای ۱۴۹۳ درجه کلونین وارد محفظه احتراق می‌شود و با پودر زغال با دبی جرمی ۰/۰۵ کیلوگرم بر ثانیه و دمای ۳۲۰ درجه کلونین واکنش انجام می‌دهد. ورودی پودر زغال ۱۹ میلی‌متر است که در شکل ۱ نشان داده شده است. برای جلوگیری از انتقال حرارت از دیواره‌های محفظه، برای دیواره‌ها از شرط مرزی آدیاباتیک استفاده شده است. اطلاعات مربوط به آنالیزهای تقریبی و نهایی پودر زغال در جدول ۱ آورده شده است [۸]. با استفاده از آنالیزهای تقریبی و نهایی ضرایب استوکیومتری واکنش گازی احتراق پودر زغال به دست می‌آید.

جدول ۱: آنالیزهای تقریبی و نهایی پودر زغال بر حسب درصد.

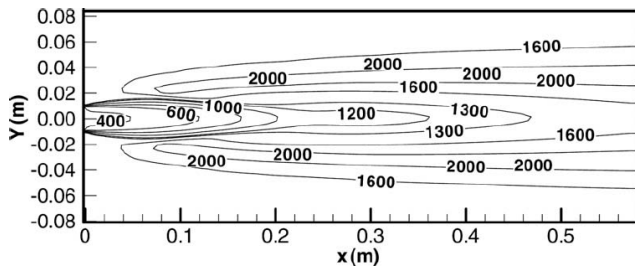
۳۴/۳۲	مواد فرار	آنالیز تقریبی
۵۶/۴۹	کربن ثابت	
۵/۵۹	خاکستر	
۳/۶	رطوبت	آنالیز نهایی
۷۸/۷۶	کربن	
۴/۸۲	هیدروژن	
۴/۷۲	اکسیژن	
۱/۶۷	نیتروژن	

احتراق گازی مواد فرار در محفظه احتراق از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد زیرا شروع فرآیند احتراق می‌باشد. زمانی که پودر زغال وارد محفظه احتراق می‌شود، ذرات در یک محیط با دمای بالا ناشی از هوای دم و انتقال حرارت تشعشعی از گازهای داغ و دمای بالای دیواره‌ها شناور می‌شوند. در این مرحله، پودر زغال پیش‌گرم شده و مواد فرار آن طی واکنش

جدول ۳: مقایسه کسر جرمی دی اکسیدکربن با کار لی و همکاران و نمونه آزمایشگاهی نیوکاسل [۱۰].

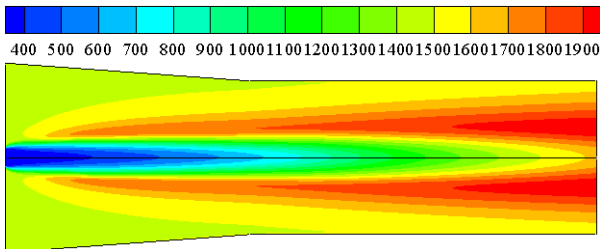
نقاط	کار حاضر	لی و همکاران	مقدار دی اکسید کربن (درصد)		اختلاف نسبی (درصد)	
			نمونه آزمایشگاهی	مقایسه با لی و همکاران	مقایسه با نمونه آزمایشگاهی	مقایسه با لی و همکاران
A	۱۲/۵۱	۱۳/۴	۱۳/۸	۶/۶۴	۹/۳۴	
B	۱۴/۷۶	۱۴/۵	۱۵/۶	۱/۷۹	۵/۳۸	
C	۱۵/۹۱	۱۵/۱	۱۴/۱	۵/۳۶	۱۲/۸۳	

همانطور که در جدول ۳ مشخص است کار حاضر از مطابقت قابل قبولی با نتایج قبلی برخوردار است. اعتبارسنجی دیگر، مربوط به شبیه سازی احتراق پودر زغال در محفظه احتراق می باشد که توسط گو و همکاران [۸] انجام گرفت. شکل ۳ خطوط همدمای حاصل از شبیه سازی حاضر را با نتایج گو و همکاران مقایسه می کند. با مشاهده شکل ۳ می توان دریافت که وقتی ذرات زغال بدون زاویه وارد محفظه می شود توزیع متقارن دمای گازی را نتیجه می دهد، همچنین با مقایسه کار حاضر با کار گو و همکاران [۸] نتیجه گرفته می شود که کار حاضر از اعتبار قابل قبولی برخوردار است.



الف) کار گو و همکاران [۸]

Gas temperature (K)



ب) کار حاضر

شکل ۳: مقایسه خطوط همدمای به دست آمده از کار حاضر با کار گو و همکاران [۸].

۳.۴ معیار همگرایی

الگوریتم مورد استفاده برای حل، سیمپل و برای معادلات مومنتوم، انرژی و نمونه های جرمی از طرح بالادست مرتبه دوم و برای معادلات انرژی جنبشی آشفتنگی، نرخ اتلاف آشفتنگی و انتقال حرارت تشعشی از طرح بالادست مرتبه اول استفاده شده است. همچنین معیار همگرایی برای تمامی معادلات 10^{-6} می باشد.

۴.۴ تأثیر دبی جرمی پودر زغال

به منظور بررسی دبی جرمی پودر زغال روی توزیع دما و پروفیل سرعت، مطالعه بر روی پنج دبی جرمی پودر زغال با مقادیر متغیر ۰/۰۱، ۰/۰۲۵،

مطالعه لاندر و اسپالدینگ [۹] می باشد. معادلات حاکم برای ذرات زغال نیز در روابط (۷) تا (۹) آورده شده اند [۳]. این معادلات به ترتیب شامل بقای جرم، مومنتوم و انرژی می باشند. در معادلات زیروند p مربوط به ذرات زغال می باشد.

$$\frac{dm_p}{dt} = -\dot{m} \quad (7)$$

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = -f_D \quad (8)$$

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = -\dot{q} \quad (9)$$

۴ نتایج عددی

۱.۴ استقلال از شبکه

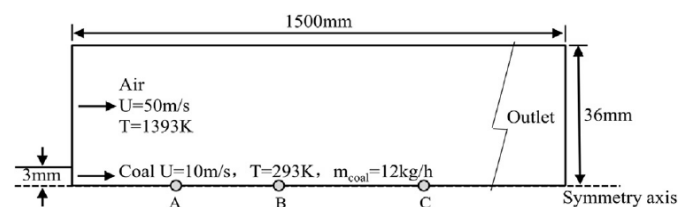
نتایج استقلال شبکه در مختصات $x = 0/۳۲$ و $y = 0/۰۴$ متر در جدول ۲ آورده شده است. ملاحظه می شود که درصد اختلاف نسبی با کاهش اندازه المان ها کم می شود، در نتیجه برای شبیه سازی از حالت ۳ یعنی اندازه المان ۰/۸ میلی متر استفاده می شود.

جدول ۲: تحلیل استقلال از شبکه.

حالت	اندازه شبکه (میلی متر)	دما (درجه کلوین)	اختلاف نسبی
۱	۲	۱۵۲۲/۸۹	۰/۹۲
۲	۱	۱۵۰۸/۷۳	۰/۱۹
۳	۰/۸	۱۵۰۵/۸	۰/۱۶
۴	۰/۶	۱۵۰۳/۲۵	—

۲.۴ اعتبارسنجی

چنانچه مسئله ای به صورت عددی حل شده باشد لازم است به منظور حصول اطمینان از درستی روش حل، نتایج پژوهش با مراجع معتبر به دست آمده توسط دیگران، مقایسه شوند. به همین دلیل در ادامه دو اعتبارسنجی به منظور تأیید روش حل انجام شده است. در اولین اعتبارسنجی مقدار کسر جرمی دی اکسیدکربن پس از اتمام احتراق با نمونه آزمایشگاهی تجهیزات احتراق نیوکاسل و شبیه سازی انجام گرفته شده توسط لی و همکاران [۱۰] مقایسه شده است. هندسه مورد استفاده برای شبیه سازی، مدل ساده شده در شکل ۲ می باشد.



شکل ۲: مدل فیزیکی تجهیزات احتراق پودر زغال در آزمایشگاه نیوکاسل.

جدول ۳ مقدار کسر جرمی اندازه گیری شده دی اکسیدکربن در سه نقطه A ، B و C روی محور هندسه را نشان می دهد که با کار لی و همکاران و نمونه آزمایشگاهی [۱۰] مقایسه شده است. فاصله نقاط مذکور از محل ورودی پودر زغال به ترتیب برابر ۰/۳۳، ۰/۶۲۶، و ۱/۰۳ متر می باشد.

شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده است. دلیل در نظر گرفتن نیمه بالایی، هندسه متقارن محفظه احتراق می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد اکسیژن موجود در هوای دم باعث افزایش دمای خروجی می‌شود به دلیل اینکه وقتی اکسیژن خالص در مقدار هوای دم ثابت، افزایش یابد نیتروژن کمتر وجود داشته و باعث افزایش دمای شعله می‌شود. این افزایش دما باعث جنب و جوش بیشتر نمونه‌های جرمی می‌شود که افزایش سرعت در خروجی را به همراه دارد. همچنین دما و سرعت با افزایش فاصله از محور افزایش و سپس کاهش می‌یابد که این امر به دلیل نزدیک شدن به دیواره‌های محفظه احتراق می‌باشد که دما برابر دمای هوای دم (شکل ۵ج) می‌باشد.

۶.۴ تأثیر دمای هوای دم

پارامتر دیگر مورد بررسی، افزایش دمای هوای دم ورودی به محفظه احتراق می‌باشد. بدین منظور شبیه‌سازی با پنج دمای ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفته است و نتایج آن به صورت تغییرات دما و سرعت در نیمه بالایی محفظه احتراق به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نمایش داده شده است.

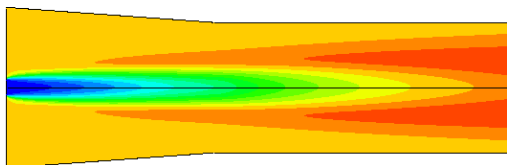
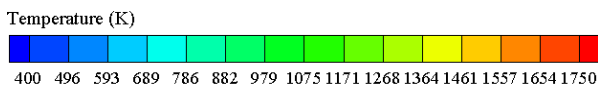
با مشاهده در شکل‌های ۸ و ۹ می‌توان دریافت که افزایش دمای هوای دم باعث افزایش انرژی گازهای داغ شده که افزایش دما و سرعت در خروجی را نتیجه می‌دهد.

۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱ کیلوگرم بر ثانیه در شرایط مرزی ذکر شده در قسمت هندسه مسئله انجام گرفته است. در شکل ۴ نتایج به صورت خطوط هم‌دما بر حسب افزایش دبی جرمی پودر زغال ارائه شده‌اند. همانطور که در شکل ۴ نمایان است افزایش دبی جرمی پودر زغال، باعث کاهش ناحیه بیشینه دما به دلیل اکسیژن کمتر در دسترس در مقدار هوای دم ثابت می‌شود، همچنین می‌توان دریافت که با افزایش دبی، مقدار زغال‌های نسوخته بیشتر شده و طول ناحیه آبی رنگ در خطوط هم‌دما بیشتر می‌شود که کشیده شدن ناحیه با دمای پایین‌تر به خروجی محفظه احتراق را به همراه دارد.

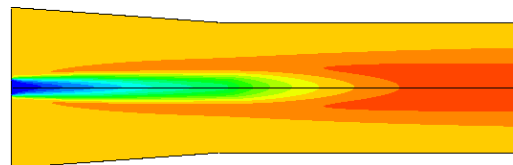
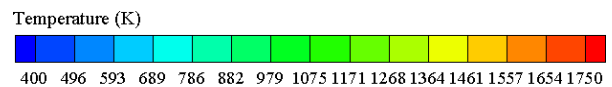
کانتور سرعت بر حسب افزایش دبی جرمی پودر زغال در شکل ۵ نمایش داده شده است. با مشاهده کانتور سرعت می‌توان اختلاف سرعت بین هوای دم و ذرات زغال و رابطه مستقیم افزایش دبی جرمی پودر زغال با سرعت خروجی را مشاهده نمود. همچنین با افزایش دبی جرمی، سرعت ورودی پودر زغال نیز افزایش می‌یابد که باعث تأثیر روی سرعت خروجی محفظه می‌شود.

۵.۴ تأثیر درصد اکسیژن در هوای دم

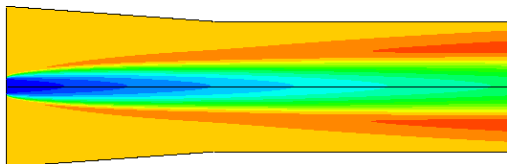
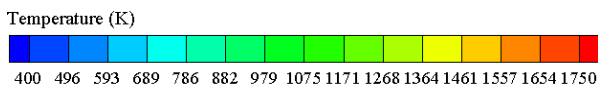
به منظور بررسی اثر درصد اکسیژن در هوای دم، شبیه‌سازی در درصد‌های اکسیژن ۲۱، ۲۴، ۲۷، ۳۰ و ۳۳ انجام گرفته است و نتایج آن به صورت تغییرات دما و سرعت در نیمه بالایی خروجی محفظه احتراق به ترتیب در



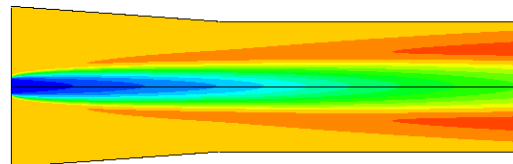
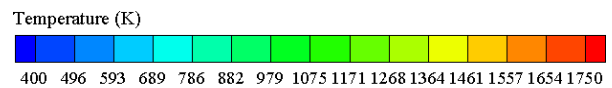
(ب) دبی پودر زغال برابر با ۰/۰۲۵ کیلوگرم بر ثانیه



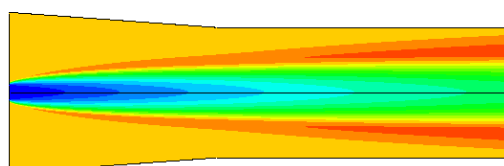
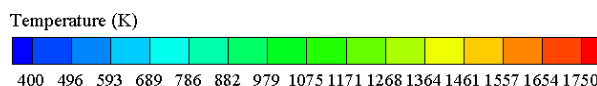
(الف) دبی پودر زغال برابر با ۰/۰۱ کیلوگرم بر ثانیه



(د) دبی پودر زغال برابر با ۰/۰۷۵ کیلوگرم بر ثانیه

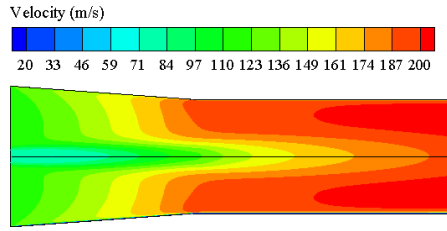


(ج) دبی پودر زغال برابر با ۰/۰۵ کیلوگرم بر ثانیه

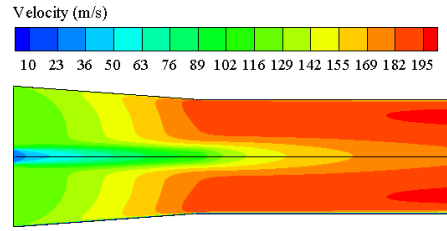


(ه) دبی پودر زغال برابر با ۰/۰۱ کیلوگرم بر ثانیه

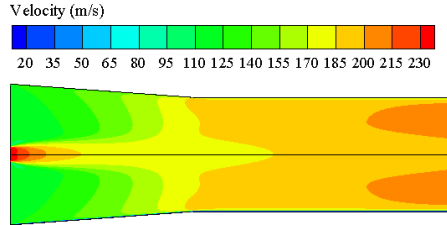
شکل ۴: خطوط هم‌دما بر حسب افزایش دبی جرمی پودر زغال.



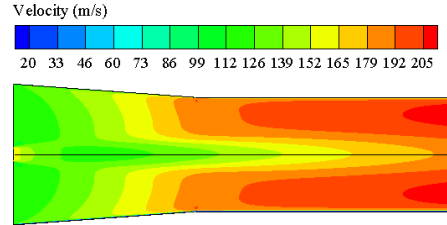
(ب) دبی پودر زغال برابر با ۲۵٪ کیلوگرم بر ثانیه



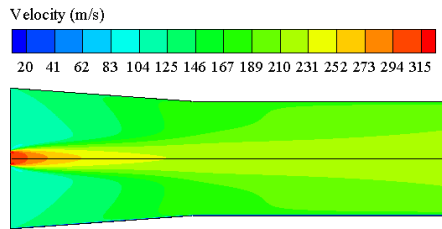
(الف) دبی پودر زغال برابر با ۱٪ کیلوگرم بر ثانیه



(د) دبی پودر زغال برابر با ۷۵٪ کیلوگرم بر ثانیه

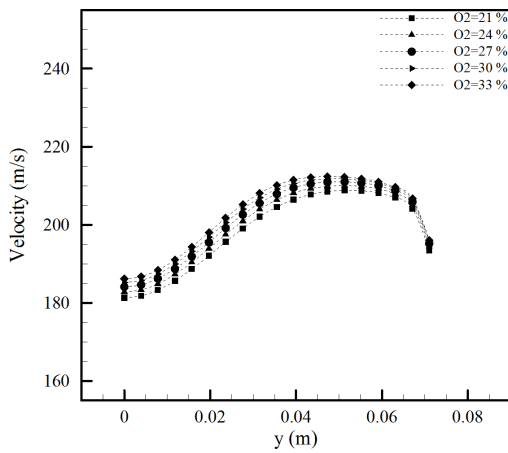


(ج) دبی پودر زغال برابر با ۵٪ کیلوگرم بر ثانیه

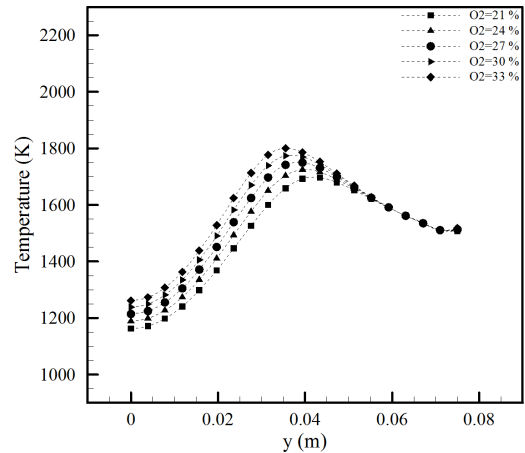


(ه) دبی پودر زغال برابر با ۱٪ کیلوگرم بر ثانیه

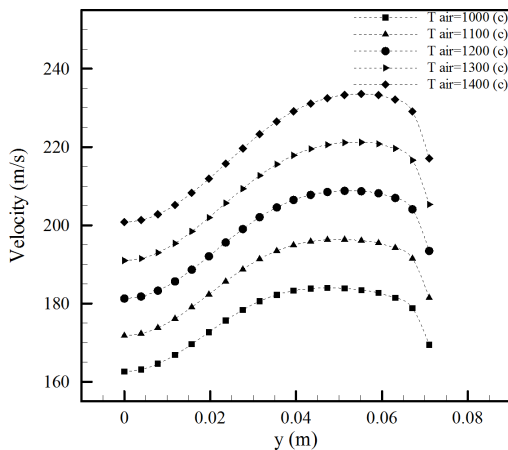
شکل ۵: کانتور سرعت بر حسب افزایش دبی جرمی پودر زغال.



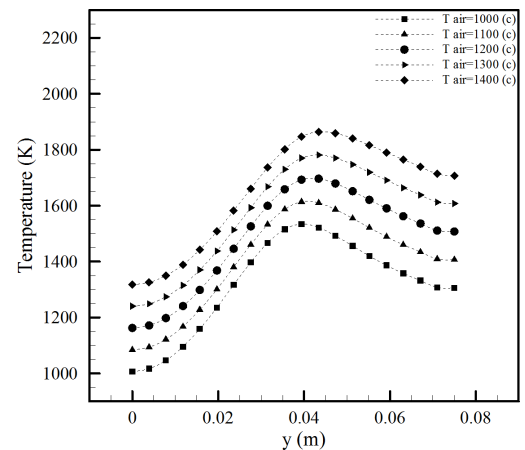
شکل ۷: تغییرات سرعت خروجی بر حسب افزایش درصد اکسیژن.



شکل ۶: تغییرات دمای خروجی بر حسب افزایش درصد اکسیژن.



شکل ۹: تغییرات سرعت خروجی بر حسب افزایش دمای هوای دم.



شکل ۸: تغییرات دمای خروجی بر حسب افزایش دمای هوای دم.

۵ نتیجه‌گیری

در کار حاضر به بررسی عددی احتراق پودر زغال در شرایط عملکرد متفاوت در حضور انتقال حرارت تشعشعی در یک محفظه احتراق استوانه‌ای پرداخته شده است و نتایج زیر حاصل شده‌اند:

۱. استفاده از سوخت‌های کمکی نظیر پودر زغال در صنایع مختلف رو به افزایش می‌باشد، مخصوصاً کوره‌بلند در صنایع فولادسازی که علاوه بر کم کردن هزینه‌های تولید چدن مذاب، مزیت‌های دیگری از قبیل کاهش مصرف کک متالوژی را به همراه دارد. همچنین از انتشار گازهای آلاینده ناشی از تولید کک جلوگیری می‌کند که گامی برای بهبود شرایط زیست‌محیطی می‌باشد.
۲. افزایش دبی جرمی پودر زغال به دلیل اکسیژن کمتر در دسترس، باعث کاهش ناحیه بیشینه دمای خروجی می‌شود ولی با توجه به قانون پیوستگی سرعت بیشینه در خروجی را افزایش می‌دهد.
۳. افزایش درصد اکسیژن در هوای دم، افزایش دما و سرعت در خروجی را نتیجه می‌دهد. این افزایش دما و سرعت ناشی از کمتر شدن نیتروژن و به مراتب افزایش اکسیژن در مقدار ثابت هوای دم می‌باشد.
۴. افزایش دمای هوای دم به دلیل افزایش انرژی گازهای ورودی، افزایش دما و سرعت در خروجی را نتیجه می‌دهد.

فهرست علائم

char	زغال باقیمانده از احتراق گازی
C_1, C_2	ثوابت جریان آشفته
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه، $J/kg \cdot K$
f_D	نیروی درگ، N
H	آنتالپی، J/kg
K	انرژی جنبشی آشفته‌گی، $kg/m \cdot s$
\dot{m}	نرخ انتقال جرم از ذرات، kg/s
p	فشار، Pa
p_k	تولید آشفته‌گی ناشی از نیروهای لزج
\dot{q}	نرخ انتقال حرارت از ذرات، W
U	سرعت میانگین، m/s
VM	مواد فرار
\dot{W}	نرخ واکنش بر واحد حجم، $kg/m^3 \cdot s$
x, y	محورهای مختصات
Γ	پخش مولکولی، $kg/m \cdot s$
ϵ	نرخ اتلاف آشفته‌گی، m^2/s^3
λ	ضریب هدایت گرمایی، $W/m \cdot K$
μ	ضریب لزجت دینامیکی، $Pa \cdot s$
μ_t	ضریب لزجت جریان آشفته، $Pa \cdot s$
ρ	چگالی، kg/m^3
σ_H	عدد پراوتل مدل آشفته
σ_k	عدد پراوتل انرژی جنبشی آشفته‌گی
σ_{Y_i}	ثابت جریان آشفته
σ_ϵ	عدد پراوتل نرخ اتلاف آشفته‌گی
i	نمونه جرمی i ام
p	ذرات زغال

مراجع

- [۱] جنتی، ابوالفضل و صابر، داریوش. بررسی اجمالی طرح تزریق پودر ذغال pci به کوره بلند. در اولین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی. دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۰.
- [2] Mathieson, John G., Truelove, John S., and Rogers, Harold. Toward an understanding of coal combustion in blast furnace tuyere injection. *Fuel*, 84(10):1229 – 1237, 2005. Special Issue Dedicated to Professor Terry Wall.
- [3] Shen, Yansong, Yu, Aibing, Austin, Peter, and Zulli, Paul. Modelling in-furnace phenomena of pulverized coal injection in ironmaking blast furnace: Effect of coke bed porosities. *Minerals Engineering*, 33:54 – 65, 2012. Computational Modelling.
- [4] de Castro, José Adilson, de Mattos Araújo, Giselle, de Oliveira da Mota, Izabel, Sasaki, Yasushi, and ichiro Yagi, Jun. Analysis of the combined injection of pulverized coal and charcoal into large blast furnaces. *Journal of Materials Research and Technology*, 2(4):308 – 314, 2013.
- [5] de Almeida Santos, Bruno Orlando, Maia, Breno Totti, Garajau, Fabricio Silveira, de Souza Lima Guerra, Marcelo, Assis, Paulo Santos, and Barros, José Eduardo Mautone. A new concept of auxiliary fuel injection through tuyeres in blast furnaces developed by numerical simulations. *Journal of Materials Research and Technology*, 3(2):142 – 149, 2014.
- [6] Zhao, Zhilong, Tang, Huiqing, Quan, Qiang, Zhang, Jiangliang, and Shi, She. Simulation study on performance of novel oxygen-coal lances for pulverized coal combustion in blast furnace tuyere. *Procedia Engineering*, 102:1667 – 1676, 2015. New Paradigm of Particle Science and Technology Proceedings of The 7th World Congress on Particle Technology.
- [7] Shen, Y.S. and Yu, A.B. Modelling of injecting a ternary coal blend into a model ironmaking blast furnace. *Minerals Engineering*, 90:89 – 95, 2016. Computational Modelling.
- [8] Gu, Mingyan, Chen, Guang, Zhang, Mingchuan, (Frank) Huang, D., Chaubal, Pinakin, and Zhou, Chenn Q. Three-dimensional simulation of the pulverized coal combustion inside blast furnace tuyere. *Applied Mathematical Modelling*, 34(11):3536 – 3546, 2010.
- [9] Launder, B.E. and Spalding, D.B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2):269 – 289, 1974.
- [10] Li, Yongqing, Zhang, Xiaohui, Zhang, Jiayuan, Zhou, Jiemin, and Yan, Hongjie. Numerical simulation and optimization of pulverized coal injection with enriched oxygen into blast furnace. *Applied Thermal Engineering*, 67(1):72 – 79, 2014.