



## شبیهسازی سهبعدی احتراق پودر زغال در دهانه لوله دمش کورهبلند در ذوبآهن اصفهان

احمدرضا رحمتي الله و بهروز آقائي آ

ar\_rahmati@kashanu.ac.ir ا استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، کاشان ۲- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، می او ای ارشد، مهندسی \* نویسنده مخاطب (تاریخ دریافت: ۹۶/۱۸/۲۰، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۶/۱۱/۱۳، پذیرش: ۹۶/۱۲/۳)

**چکیده**: در کار حاضر، به شبیهسازی سهبعدی احتراق پودر زغال در دهانه لوله دمش کورهبلند در حضور گاز طبیعی در کارخانه ذوب آهن اصفهان، در حالت پایا، پرداخته شده است و اثر پارامترهای دمش شامل درصد اکسیژن در هوای دم و دمای هوای دم در خروجی لوله دمش بررسی شده است. از سوختهای کمکی در کورهبلند، به منظور افزایش بهرهوری، کاهش هزینههای تولید و بالابردن بازده، در صنایع فولادسازی استفاده میشود. در حالت اول، شبیهسازی بدون حضور گاو طبیعی در کاهش هزینههای تولید و بالابردن بازده، در صنایع فولادسازی استفاده میشود. در حالت اول، شبیهسازی بدون حضور کاوه و بالابردن بازده، در صنایع فولادسازی استفاده میشود. در حالت اول، شبیهسازی بدون حضور کور زغال انجام گرفته است و و بالابردن بازده، در صنایع فولادسازی استفاده میشود. در حالت اول، شبیهسازی بدون حضور پودر زغال انجام گرفته است و فقط گاز طبیعی بهعنوان سوخت درنظر گرفته شده است. در حالت دوم، گاز طبیعی حدف شده و رفتار پودر زغال به تنهایی در دهانه لوله دمش شبیهسازی شده است. مدل احتراقی مورد استفاده برای دو حالت بود و مالت و مان و در دال گرفته شده است. در حالت دوم، گاز طبیعی ده مان سوخت درنظر گرفته شده است. در حالت دوم، گاز طبیعی حدف شده و رفتار پودر زغال به تنهایی در دهانه لوله دمش شبیه سازی شده است. مدل احتراقی مورد استفاده برای دو حالت یاد مدور ای با استفاده از مود استفاده برای دو حالت سوم، احتراق ترکیب سوختهای گاز طبیعی و پودر زغال در دهانه لوله دمش با استفاده از مدل احتراق اتلاف گردابه شبیه سازی شده است. نتایج نشان می دهد که افزایش درصد اکسیژن و دمای هوای دم در هر سه حالت، افزایش دما و سرعت در خروجی لوله دمش را نتیجه می دهد. برای مدل سازی جریان آشفته از مدل استاندارد ع له و برای انتقال حرارت تشعشعی ناشی از گازهای داغ، از مدل استفاده شده است.

كليدواژگان: پودر زغال، كورهبلند، دهانه لوله دمش، احتراق غير پيش أميخته، احتراق اتلاف گردابه

#### مقدمه

امروزه، یکی از اساسیترین پایههای اقتصادی و اجتماعی کشورهای جهان را صنایع آهن و فولاد تشکیل میدهد و این بهسبب نیاز مبرمی است که انسان جهت پیشبرد مقاصد خود در زندگی دارد. کارکرد فولاد در امر ساختمانسازی، پلسازی، صنایع اتومبیل، کشتیسازی و لکوموتیوسازی است و بهصورت آلیاژهای مختلف، اساس تکنولوژی ماشینآلات را تشکیل میدهد [۱]. با توجه به تنوع موارد استفاده فولاد در دنیا و گستردهشدن دایره مصرف آن، تولید فولاد، همگام با پیشرفت تکنولوژی، تغییرات بسیاری داشته است که در پی این تغییرات، تولیدکنندگان سعی در بالابردن بهرهوری و استفاده از انرژی و سوختهای ارزان تر به توجه به محیط جغرافیایی خود کردهاند. امروزه، فناوریهای مورد استفاده در تولید محصولات فولادی در مراحل بعد از بهدست آوردن فولاد مذاب، یعنی ریخته گری و نورد، یکسان است، اما، برای بهدست آوردن فولاد مذاب یا خام، از فناوریهای مختلفی میتوان استفاده کرد. بهطور کلی، فولاد خام در ایران از دو روش تولید میشود: الف) تهیه آهن خام یا چدن مذاب در کورهبلند<sup>۱</sup> و تولید فولاد در کنورترهای اکسیژنی، که این روش در کارخانه ذوبآهن اصفهان انجام میشود؛ ب) احیای مستقیم سنگآهن و ذوب آهن اسفنجی و قراضه در کورههای الکتریکی، ازقبیل قوس الکتریکی نظیر فولاد خورستان یا کورهای القایی

<sup>1.</sup> Blast furnace

نظیر مجتمع فولاد جنوب. در روش اول، که شیوه سنتی تولید است، از احیای غیرمستقیم آهن استفاده شده، سنگ آهن پس از فرآوری به همراه آهک و کک وارد کوره بلند شده و آهن خام یا چدن مذاب به دست می آید. در مرحله بعد، آهن خام در یک مبدل به فولاد مذاب تبدیل شده، کربن و ناخالصی های دیگر آن به کمک اکسیژن خارج و فولاد خام تولید می شود. روش دوم تولید فولاد استفاده از کوره های الکتریکی و ذوب مجدد قراضه آهن و فولاد است. به دلیل کمبود منابع قراضه در جهان و نیز رشد فزاینده قیمت آن در طول سال های گذشته، در این روش، می توان به همراه قراضه از آهن اسفنجی نیز برای ذوب در کوره استفاده کرد [۲]. همان طور که ذکر شد، روش تولید فولاد در کارخانه ذوب آهن اصفهان شیوه سنتی تولید است؛ یعنی از احیای غیر مستقیم آهن استفاده می شود. کورهبلند یکی از بخش های اصلی خط تولید ذوب آهن اصفهان است که وظیفه آن احیای سنگ آهن و تولید آن به چدن مذاب است و هدف اصلی این بخش تولید چدن مذاب برای استفاده در بخشهای دیگر است. شکل ۱ طرحواره ای ساده از کوره بلند را نمایش می دهد. مهم ترین فرایندی که در کوره بلند انجام می شود احیای اکسیدهای شکل ۱ طرحواره ای ساده از کوره بلند را نمایش می دهد. مهم ترین فرایندی که در کوره بلند انجام می شود احیای اکسیده ای آهن، ذوب آهن خام و جدایش آن از ناخالصی هاست. سنگ آهن، زغال و سنگ آهک از بالای کوره وارد شده و هوای پیش گرم زیاد، به بالای کوره صود هوای داغی که به کف کوره دمیده می شود، طی زمان ۶ تا ۸ ثانیه بعد از انجام واکنش های شیمیایی زیاد، به بالای کوره صود می کند.



شکل ۱- طرحوارهای از کورهبلند[۳]

در سالهای اخیر، تلاشهای قابل ملاحظهای بهمنظور افزایش قابلیت تولید کورهبلند انجام گرفته است. استفاده از سوختهای کمکی در کورهبلند بهمنظور افزایش بهرهوری، کاهش هزینههای تولید و بالابردن بازده در اکثر نقاط دنیا در صنایع فولادسازی استفاده میشود. یکی از سوختهای کمکی مورد استفاده در کورهبلند پودر زغال است.

امروزه، با توجه به قیمت بالای کک در دنیا و نیاز ذوب آهن به آن به عنوان سوخت و ماده اولیه برای تولید فولاد، نیاز به سوختهای کمکی جهت جایگزین کردن کک احساس می شود. انتخاب سوخت کمکی همچون گاز طبیعی، نفت، زغال و سایر مواد کربنی جهت تزریق به کوره بلند بر پایه عوامل اقتصادی صورت می گیرد. چرا که به کارگیری هر یک از مواد سوختی می تواند از مصرف کک متالوژی، که بخش عمدهای از قیمت تمام شده چدن مذاب تولیدی را شامل می شود، بکاهد، مخارج می تواند از مصرف کک متالوژی، که بخش عمدهای از قیمت تمام شده چدن مذاب تولیدی را شامل می شود، بکاهد، مخارج می تواند از مصرف کک متالوژی، که بخش عمدهای از قیمت تمام شده چدن مذاب تولیدی را شامل می شود، بکاهد، مخارج مرتبط با باتری های کک سازی را (به دلیل کاهش مصرف کک) کمان می شود، بکاهد، محارج کربط با باتری های کک سازی موجود و سرمایه گذاری برای ایجاد باتری های جدید کک سازی را (به دلیل کاهش مصرف کک) کاهش دهد و با افزایش کارایی و امکان کنترل بیشتر عملیات کوره بلند، از هزینه چدن مذاب تولیدی بخاه دارد. کاهش مصرف کک) کاهش آلودگی محیطزیست و انتشار ذرات گلخانه ای و مونوکسید کربن در هوا را به همراه دارد (با دلیل کاهش مصرف کلی) کاهش آلودگی محیطزیست و انتشار ذرات گلخانه ای و مونوکسید کربن در هوا را به همراه دارد [۴]. تزریق پودر زغال داخل کوره بلند یکی از روش های مؤثر برای افزایش بهرهوری است و استفاده آن در کوره مزایای زیر را به همراه دارد: بالابردن بازده

کورهبلند، پایداری عملیات کورهبلند، کاهش مصرف کک گران قیمت، کاهش هزینههای تولید فولاد، دردسترس بودن زغالسنگ، کاهش انتشار ذرات گلخانهای و مونوکسیدکربن در هوا. قبل از ورود به بحث موردنظر، تعاریف و اصطلاحاتی که مربوط به تجهیزات کورهبلند و مبحث احتراق پودر زغال است ارائه شده است. این اصطلاحات شامل لوله دمش یا بلوپایپ<sup>۱</sup>، دهانه لوله دمش یا تویر<sup>۲</sup>، ناحیه چرخشی یا ریسوی<sup>۳</sup> و لانس تزریق<sup>†</sup> است. لوله دمش یا بلوپایپ لولهای است که هوای دم<sup>6</sup> مورد نیاز کورهبلند را از محلهای مربوط به تولید هوا با دما و فشار بالا به کورهبلند می ساند. دهانه لوله دمش یا تویر لوله یا نازلی است که پس از لوله دمش در دهانه کورهبلند قرار دارد و مخلوط هوای دم و سایر سوختهای کمکی را به مرکز کوره هدایت می کند. ریسوی ناحیهای است چرخشی و بالنیشکل که در داخل کورهبلند و درست جلوی دهانه لوله دمش رخ می دهد که بالاترین دما و عملیات کاهش کک در این ناحیه اتفاق می افتد. ماده اصلی داخل ریسوی کک، گاز و پودر زغال است. تجهیزات دمش و ریسوی در شکل ۱ نمایش داده شدهاند. محل ورود سوختهای کمکی و اکسیژن داخل لوله دمش و دهانه لوله دمش یکی و لانه یا نازل با قطر بسیار کم است که به آن لانس تزریق می گویند. لانسها انواع مختلفی دارند که می دوانه به لانس تکی و لانس دوگانه اشاره کرد. شکل ۲ انواع لانس می در و درست جلوی دهانه لوله دمش رخ می توان به لانس تکی و لانس دوگانه اشاره کرد. شکل ۲ انواع لانس را نشان می دهد.



شكل ۲- نمايش انواع لانس تزريق: الف) لانس تكى[۵]، ب) نمايي از لانس دوگانه[۶]

در زمینه تزریق پودر زغال در دهانه لوله دمش و کورهبلند، مطالعات زیادی انجام شده است که در ادامه تعدادی از آنها آورده شده است. ژانگ و همکاران[۷] در سال ۲۰۱۰ مدل دوبعدی احتراق پودر زغال در لوله دمش، دهانه لوله دمش و ریسوی با ضریب تخلخل ۲/۴ را شبیه سازی کردند. نتایج کار آنها به صورت توزیع دما، فشار و کسرهای جرمی هریک از ذرات حاصل از واکنش است. نتایج کار آنها نشان می دهد که بیشترین دما (۲۴۲۳ درجه کلوین) و بیشترین فشار در ناحیه پایین ریسوی رخ می دهد. رایگان و همکاران[۸] در سال ۲۰۱۰ در کاری تجربی به بررسی چهار نوع زغال موجود در منابع ایران

<sup>1.</sup> Blowpipe

<sup>2.</sup> Tuyere

<sup>3.</sup> Raceway

<sup>4.</sup> Injection lance

<sup>5.</sup> Blast air

و طبس بود. نتایج کار آنها نشان میدهد که زغال با مواد فرار بالاتر (زغال کارمزد با مواد فرار ۳۴ درصد) برای تزریق بهتر است. جنتی و صابر [۴] در سال ۲۰۱۱ فرایند تزریق پودر زغال به کورههایبلند کارخانه ذوب آهن اصفهان را بهلحاظ اقتصادی و فنی بررسی کردند. نتایج کار آنها نشان میدهد که با استفاده از این فرایند، از یک سو، مصرف گاز طبیعی، اکسیژن و کک کاهش یافته و از سوی دیگر تولید چدن نیز افزایش می یابد. این کاهش مصرف و افزایش تولید باعث افزایش سوددهی شرکت می شود. شن و همکاران [۹]، در سال ۲۰۱۱، مدل عددی احتراق پودر زغال و کک را در یک کورهبلند شبیه سازی کردند. حجم کنترل آنها شامل لانس، لوله دمش، دهانه لوله دمش، ریسوی و بستر کک بود. آنها ریسوی را شبیه بالن و بستر کک را شبیه جعبه مکعبی شکل در شبیه سازی درنظر گرفتند. نتایج نشان می دهد که در ناحیه ریسوی سرعت و دمای گاز، توزیع دىاكسيدكربن و مواد فرار بالاتر از ساير نقاط است. نسبت احتراق نيز به سرعت افزايش يافته، كه عامل اصلى آن واكنش گازى پودر زغال است. یه و همکاران[۱۰]، در سال ۲۰۱۲، به شبیهسازی احتراق پودر زغال و گاز خروجی کورهبلند (دیاکسیدکربن) بهصورت همزمان با استفاده از دو الگوی تزریق لانس دوگانه و لانس هممحور با استفاده از نرمافزار فلوئنت پرداختند. در هر دو الگو، گاز دیاکسیدکربن بهعنوان خنککار استفاده شد. آنها دریافتند که در لانس هممحور، ناحیه دمابالا در فاصله کمتری از دهانه لوله دمش رخ میدهد، زیرا قطر بیشتر در لانس هممحور باعث پراکندگی بیشتر ذرات و در نتیجه تبخیر سریعتر مواد فرار می شود. کاسترو و همکاران [11]، در سال ۲۰۱۳، احتراق همزمان پودر زغال و پودر زغال چوب به کورهبلند را با استفاده از روش حجم محدود بهصورت سهبعدی شبیهسازی کردند. تفاوت پودر زغال چوب با پودر زغال در خاکستر، گوگرد و سیلیس کمتر و مواد فرار بالاتر است. همچنین، دمای کمتری (حدود ۷۰۰ درجه سلسیوس) را برای احتراق نیاز دارد. آنها کورهبلند را یک راکتور دارای ۶ فاز متفاوت گاز، کلوخههای جامد، فلز داغ، خاکستر گداخته، پودر زغال و پودر زغال چوب فرض کردند. نتایج کار آنها نشان میدهد که ترکیب دو سوخت، تولید کوره را ۲۵ درصد افزایش میدهد. لی و همکاران[۱۲]، در سال ۲۰۱۴، به شبیهسازی سهبعدی احتراق پودر زغال براساس مدل واقعی کورهبلند با استفاده از نرمافزار فلوئنت پرداختند. آنها اثر پارامترهای نوع پودر زغال، نرخ تزریق پودر زغال، نرخ غنیسازی اکسیژن، دمای هوای دم، حجم هوای دم و زاویه تزریق پودر زغال را بررسی کردند. نتایج کار آنها نشان میدهد که با مقادیر بهینه در هر یک از این پارامترها، میتوان نسبت احتراق را تا ۱۱۰/۸ درصد افزایش داد. دو و همکاران[۱۳]، در سال ۲۰۱۵، احتراق پودر زغال داخل لوله دمش، دهانه لوله دمش و ریسوی در کورهبلند را برای شرکت تولید فولاد چین با استفاده از نرمافزار فلوئنت شبیهسازی کردند. سه الگوی تزریق لانس تکی، لانس دوگانه هممحور با خنککاری هوا و لانس اکسیژن-زغال با اکسیژن غنی شده ۴۰ تا ۱۰۰ درصد بررسی شد. نتایج کار آنها نشان میدهد که بازده عملکرد کوره، هنگام استفاده از لانس دو گانه، ۵/۱ درصد بهبود مییابد. شن و یو[۱۴]، در سال ۲۰۱۶، احتراق ترکیب سه نوع پودر زغال را در کورهبلند در حالت سهبعدی شبیهسازی کردند. آنها، در ابتدا، عملکرد تکتک زغالها را بررسی کردند و سپس آنها را به نسبت مساوی با یکدیگر ترکیب کرده و در کورهبلند تزریق کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که هنگام ترکیب سه نوع زغال با یکدیگر نسبت احتراق در مقایسه با زغالهای تکی افزایش مییابد، زیرا زغال با مواد فرار بالاتر باعث تبخير سريعتر شده و ميدان دمايي بالايي را در كوره پديد ميآورد كه همين امر باعث تبخير زغالها با مواد فرار پایین تر می شود. لیائو و همکاران [۱۵]، در سال ۲۰۱۶، به شبیه سازی سه بعدی احتراق پودر زغال قهوهای به لوله دمش، دهانه لوله دمش، ریسوی و بستر کک در کورهبلند با استفاده از نرمافزار انسیس سیافایکس ۱۵ پرداختند. زغال قهوهای، در مقایسه با زغال سیاه، نرمتر و جدیدتر است و همچنین رطوبت بالا (حدود ۶۵ درصد)، خاکستر و مقدار سولفور پایین تری دارد. همچنین، این نوع زغال دارای مواد فرار بالایی است که هنگام احتراق، دما و نسبت احتراق بالاتری را نتیجه ميدهد. نتايج كار أنها نشان ميدهد كه شبيهسازي عددي با نتايج أزمايشگاهي (رسيدن دما و نسبت احتراق بالا در مقايسه با زغال سیاہ) مطابقت قابل قبولی دارد.

<sup>1.</sup> Pulverized charcoal

نشریه علمی- پژوهشی سوخت و احتراق، سال یازدهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۷

با مروری بر تحقیقات علمی صورت گرفته در این زمینه، بهروشنی مشخص می شود که مطالعه و شبیه سازی در زمینه احتراق پودر زغال در دهانه لوله دمش کوره بلند ذوب آهن اصفهان در حضور گاز طبیعی انجام نشده است. با توجه به عدم وجود چنین تحقیقی در زمینه ذکرشده و اهمیت تولید فولاد، هدف کار حاضر یافتن تئوری های موجود و مطالعه درباره آن هاست. همچنین، یافتن چگونگی توزیع دما و سرعت در دهانه لوله دمش در سه حالت گاز طبیعی، پودر زغال بدون حضور گاز طبیعی و گاز طبیعی و پودر زغال با ورودی های جداگانه با استفاده از نرم افزار انسیس فلوئنت ۱۶ است. بدین منظور، در حالت اول، شبیه سازی در دهانه لوله دمش کوره بلند ذوب آهن در شرایط عملکرد اسمی (ایدئال)، با حضور گاز طبیعی به عنوان سوخت کوره بلند، بدون حضور پودر زغال با موردی های جداگانه با استفاده از نرم افزار انسیس فلوئنت ۱۶ است. بدین منظور، در حالت اول، شبیه سازی در دهانه لوله دمش کوره بلند ذوب آهن در شرایط عملکرد اسمی (ایدئال)، با حضور گاز طبیعی به عنوان سوخت موجود در هوای دم و دمای هوای دم روی خروجی دهانه لوله دمش بررسی می شود. در حالت دوم، گاز طبیعی از شبیه سازی موجود در هوای دم و دمای هوای دم روی خروجی دهانه لوله دمش بررسی می شود. در حالت دوم، گاز طبیعی از شبیه سازی موجود در موای دم و دمای هوای دم روی خروجی دهانه لوله دمش بررسی می شود. در حالت دوم، گاز طبیعی از شبیه سازی موجود در موای دم و دمای هوای دم روی خروجی دهانه لوله دمش بررسی می شود و توزیع سرعت و رفتار احتراقی آن ناحیه مورد بررسی قرار می گیرد. زغال در دهانه لوله دمش به عنوان سوخت کوره اضافه می شود و توزیع سرعت و رفتار احتراقی آن ناحیه مورد براسی قرار می گیرد. زغال مورد استفاده در شبیه سازی زغال کارمزد[۸] است. در حالت سوم، گاز طبیعی و پودر زغال به طور همزمان، از ورودی های جداگانه وارد محفظه می شوند و همانند دو حالت بالا، اثر تغییر پارامترهای دمش کوره برای احتراق همزمان گاز طبیعی و پودر زغال با هوای دم مطالعه می شود.

## فرایند احتراق پودر زغال در کورهبلند

احتراق پودر زغال در تجهیزات کورهبلند (لوله دمش، دهانه لوله دمش، ریسوی و کورهبلند)، بهدلیل حضور جریان آشفته، واکنشهای شیمیایی، انتقال حرارت و جرم، یکی از سخت ترین و پیچیده ترین مدل سازی هاست. علاوه بر مسائل گفته شده، عدم دسترسی به نواحی ذکر شده هنگام عملیات کوره، به دلیل بالابودن دما در آن ناحیه، از دیگر مشکلات سر راه برای تجزیه و تحلیل این قبیل مسائل است. به همین دلایل، شبیه سازی های عددی پیرامون این موضوع روز به روز در حال گسترش است. واکنش های احتراق زغال در جدول ۱ مشاهده می شود و طی مراحل زیر اتفاق می افتد [۱۶]: ۱) پیش گرمایش، ۲) تبخیر مواد فرار از زغال خام، ۳) احتراق گازی مواد فرار و ۴) اکسایش و تبدیل به گاز زغال باقی مانده (کربن جامد)<sup>۱</sup>. نرخ واکنش، نوع مدل استفاده شده و ثوابت موجود در هر واکنش در کار شن و همکاران ارائه شده است [۱۶].

Table 1- Chemical reaction of coal [10]					
Reactions	Descriptions	Models			
Coal→VM+Char	DE volatilization	Two competing reaction model			
$VM+O_2 \rightarrow CO_2+H_2O$	Gaseous combustion	Eddy dissipation model			
$Char+O_2 \rightarrow CO_2$	Char oxidation	Gibb model			
Char+CO <sub>2</sub> →2CO	Char gasification	Gibb model			
$Char+H_2O\rightarrow CO+H_2$	Char gasification	Gibb model			

جدول ۱- واکنشهای شیمیایی احتراق زغال[۱۶] Table 1- Chemical reaction of coal [16]

زمانی که پودر زغال توسط لانسها به داخل لوله دمش و دهانه لوله دمش تزریق می شود، ذرات در یک محیط با دمای بالا ناشی از هوای دم و انتقال حرارت تشعشعی از گازهای داغ، دمای بالای دیوارهها و انتقال حرارت جابه جایی شناور می شوند. در این مرحله، پودر زغال پیش گرم شده و مواد فرار آن تبخیر می شود. در این لحظه، اکسیژن موجود در هوای دم، طی زمانی بسیار کوتاه، با مواد فرار تبخیر شده از سطح زغال واکنش داده و احتراق گازی ناشی از مواد فرار زغال آغاز می شود. اگرچه بسته به نوع زغال، کربن جامد باقی مانده از تبخیر مواد فرار نیز در آن ناحیه محترق می شود و آنها نیز به گاز دی اکسیدکربن، مونوکسید کربن و هیدروژن و غیره تبدیل می شوند. شایان ذکر است که احتراق گازی مواد فرار در دهانه لوله دمش از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا هم شروع فرایند احتراق در این مرحله است و هم سرعت افزایش نسبت احتراق به این مرحله بستگی دارد.

<sup>1.</sup> Char (C(s))

مدل جریان آشفته مورد استفاده در کار حاضر مدل استاندارد  $k - \epsilon$  است، زیرا متداول ترین مدل جریان آشفته برای کاربردهای صنعتی است. معادلات  $\varepsilon = k$  دارای ضرایب تجربیاند که مقدار آنها براساس نتایج تجربی معتبر بهدست خواهد آمد، گرچه میتوان ضرایب محاسبهشده را برای رسیدن به جوابهایی که با نتایج تجربی تطابق بیشتری داشته باشند تغییر داد. ثوابت جریان آشفته به کار رفته در این شبیهسازی براساس مطالعه لاندر و اسپالدینگ[۱۷] است. در کار حاضر، برای شبیهسازی احتراق در حالت اول (گاز طبیعی بهعنوان سوخت کوره) و حالت دوم (پودر زغال بهعنوان سوخت کوره) از روش احتراق غیرپیش آمیخته و برای حالت سوم (گاز طبیعی و پودر زغال به عنوان سوخت کوره) از مدل احتراق اتلاف گردابه آ استفاده شده است. در مدل احتراق غیرپیش آمیخته، سوخت و اکسیدکننده در جریان های جداگانهای به سیستم وارد می شوند [۱۸]. وقتی که سوخت با هوای دم با دمای بالا واکنش میدهد، واکنش احتراق در مقایسه با نرخ اختلاط بسیار سریعتر رخ میدهد. بنابراین، از مدل تابع چگالی احتمال کسر مخلوط در احتراق غیرپیشآمیخته استفاده میشود. در این روش، معادله انتقال نمونههای جرمی حل نمی شود و به جای آن معادلات انتقال کسر مخلوط حل می شوند[۱۸]. کسر مخلوط برابر است با کسر جرمی موضعی المانهای سوختهشده و نسوخته جریان سوخت در تمامی نمونههای جرمی. در واقع، کسر مخلوط پایه مدل احتراق غیرپیش آمیخته است. قدرت مدل احتراق غیرپیش آمیخته این است که احتراق به یک یا دو واکنش کسر مخلوط کاهش مییابد و تمام پارآمترهای ترمودینامیکی اسکالر (کسر جرمی نمونههای جرمی، چگالی و دما) به کسر مخلوط وابسته می شود. در نتیجه، احتراق به یک مسئله اختلاط ساده سازی شده و از مشکلات پیش آمده از قبیل نرخ میانگین غیرخطی واکنش صرفنظر می شود. هنگامی که که بودر زغال همراه با یک سوخت دیگر، اعماز سوختهای گاز، مایع یا جامد، وارد محفظه احتراق می شود، باید برای مدل سازی احتراق زغال از کسر مخلوط تکی و برای سوخت دوم جریان ثانویه درنظر گرفت که همین امر سبب پیچیدهشدن مسئله و همگرایی کند در روند حل می شود. زیرا، برای مسائل شامل کسر مخلوط دوتایی، باید شرایط مرزی برای کسر مخلوط ثانویه و واریانس آن را برای مخلوط سوخت به کار برد. هنگامی که دو نوع سوخت وارد ناحیه واکنشی میشود، بهدلیل اینکه کاربر قادر است برای هر سوخت نام واکنش، نوع واکنش، واردکردن تعداد و انتخاب نمونههای جرمی واکنش دهنده، واردکردن تعداد و انتخاب نمونههای جرمی فرآورده، تعیین ضرایب استوکیومتری و غیره را برای هر واکنش بهصورت جداگانه تعیین کند، از مدل اتلاف گردابه استفاده می شود. در مدل احتراق اتلاف گردابه کسر جرمی نمونههای جرمی پیشبینی میشود[۱۸]. برای استفاده از این روش باید مدل های برهم کنش آشفتگی-شیمی ً را انتخاب کرد. برهم کنش آشفتگی-شیمی نرخ واکنشی است که بهصورت عبارت چشمه در معادله انتقال نمونههای جرمی ظاهر می شود و به مدلهای نرخ محدود آرام ۲، نرخ محدود-اتلاف گردابه ۹، احتراق اتلاف گردابه و مدل احتراق مفهوم اتلاف گردابه ۲ طبقهبندی می شود. مدل نرخ محدود آرام به محاسبه عبارت چشمه با استفاده از مفهوم آرنیوس پرداخته و از برهم کنش آشفتگی-شیمی چشمیوشی میکند. در این مدل، اثر نوسانات آشفتگی نادیده گرفته می شود و نرخ واکنش با استفاده از سینتیک آرنیوس محاسبه می شود. مدل نرخ محدود-اتلاف گردابه نرخ آرنیوس و نرخ اختلاط را محاسبه کرده و کمترین مقدار را برای محاسبات مورد استفاده قرار میدهد. ذکر این نکته لازم است که این مدل فقط برای جریان آشفته استفاده می شود. در مدل احتراق اتلاف گردابه فقط نرخ اختلاط محاسبه شده و از محاسبات سنگین سینتیک شیمیایی آرنیوس چشمپوشی میشود. در مدل يادشده نرخ واكنش بهوسيله اختلاط آشفتكى كنترل مىشود. مدل احتراق مفهوم اتلاف گردابه توسعهيافته مدل احتراق اتلاف گردابه است که بهمنظور درنظر گرفتن جزئیات مکانیزمهای شیمیایی در جریانهای آشفته آورده شده است. در این مدل، سینتیک شیمیایی مدل آرنیوس در شعله آشفته درنظر گرفته میشود.

3. Turbulence-chemistry interaction

<sup>1.</sup> Non-premixed combustion

<sup>2.</sup> Eddy dissipation

Laminar finite-rate
 Finite-rate/Eddy dissipation

<sup>6.</sup> Eddy dissipation concept

#### هندسه مسئله

#### حالت اول) گاز طبیعی به عنوان سوخت کورهبلند

هندسه دهانه لوله دمش کورهبلند، در حالت گاز طبیعی بهعنوان سوخت کورهبلند، بهصورت طرحواره، در شکل ۳، آورده شده است. همان طور که مشخص است، هوای دم از ورودی با قطر ۱۸۰ میلیمتر وارد می شود. ورودی گاز طبیعی نیز، در دیواره دهانه لوله دمش با قطر ۴۲ میلیمتر و با زاویه ۱۵ درجه نسبت به محور وها قرار دارد. پس از انجام واکنشهای شیمیایی، مخلوط نمونههای جرمی از خروجی با قطر ۱۳۰ میلیمتر به داخل کورهبلند هدایت می شوند ذکر این نکته لازم است که انحراف دیوارههای دهانه لوله دمش نسبت به سطح افقی ۵ درجه و طول دهانه لوله دمش ۴۱۰ میلیمتر است. همچنین، به دلیل عایق بودن دیوارهها از شرط مرزی بی دررو برای دیوارهها در تمامی حالات استفاده شده است.



#### حالت دوم) پودر زغال بهعنوان سوخت کورهبلند

دومین حالت برای شبیهسازی درنظر گرفتن پودر زغال بهعنوان سوخت کمکی کورهبلند در دهانه لوله دمش است. در این حالت، گاز طبیعی از شبیهسازی حذف شده و هوای دم با دمای بالا و درصد اکسیژن مشخص وارد محفظه میشود و با پودر زغال واکنش انجام میدهد. هندسه دهانه لوله دمش کورهبلند در حالت دوم بهصورت طرحواره در شکل ۴ آورده شده است. ابعاد هندسه دهانه لوله دمش مانند حالت اول است با این تفاوت که محل ورودی گاز طبیعی در دیواره دهانه لوله دمش حذف شده و بهجای آن در مرکز ورودی هوای دم، لانس ورودی پودر زغال با قطر ۲۰ میلیمتر و زاویه انحراف ۵ درجه فرض شده است. زاویه انحراف لانس پودر زغال موازی با دیوارههای دهانه لوله دمش است. عمق تورفتگی ورودی پودر زغال ۱۵ میلیمتر درنظر گرفته شده است.

## حالت سوم) گاز طبیعی و پودر زغال بهعنوان سوخت کورهبلند

در این حالت، گاز طبیعی و پودر زغال هر دو بهعنوان سوختهای کمکی کورهبلند در دهانه لوله دمش درنظر گرفته میشوند و هوای دم با دمای بالا و درصد اکسیژن مشخص وارد محفظه شده و هم با گاز طبیعی و هم با پودر زغال واکنش انجام میدهد. احمدرضا رحمتي وبهروز أقائي





هندسه دهانه لوله دمش کورهبلند بهصورت طرحواره در شکل ۵ آورده شده است. ابعاد هندسه مانند دو حالت گاز طبیعی و پودر زغال است، با این تفاوت که فاصله مرکز لانس پودر زغال تا مرکز ورودی هوای دم ۴۰ میلیمتر است. زاویه انحراف آن در این حالت ۱۰ درجه و عمق تورفتگی این ورودی به اندازه ۲۰ میلیمتر انتخاب شده است.



Figure 5- The tuyere geometry in natural gas and pulverized coal شکل ۵- هندسه دهانه لوله دمش در حالت گاز طبیعی و پودر زغال: الف) هندسه سهبعدی، ب) هندسه دوبعدی

#### معادلات حاكم

معادلات حاکم در شرایط پایا برای فاز گاز در روابط (۱) تا (۶) آورده شده است. این معادلات بهترتیب شامل معادلات بقای جرم، تکانه، انرژی، انرژی جنبشی آشفتگی، نرخ اتلاف آشفتگی و نمونههای جرمی گاز است.

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

$$\nabla \cdot (\rho \boldsymbol{U} \boldsymbol{U}) - \nabla \cdot \left( (\boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\mu}_t) (\nabla \boldsymbol{U} + (\nabla \boldsymbol{U})^T) \right) = \nabla \left( \boldsymbol{p} + \frac{2}{\tau} \rho \boldsymbol{k} \right) + \sum f_{\rm D}$$

$$\tag{1}$$

$$\nabla \cdot \left( \left( \rho U H \right) - \left( \frac{\lambda}{C_n} + \frac{\mu_t}{\sigma_H} \right) \nabla H \right) = \sum \dot{q}$$
(7)

$$\nabla \cdot \left(\rho \boldsymbol{U}\boldsymbol{k} - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) \nabla \boldsymbol{k}\right) = \left(p_k - \rho\varepsilon\right) \tag{f}$$

$$\nabla \cdot \left(\rho \boldsymbol{U}\varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}}\right)\nabla\varepsilon\right) = \frac{\varepsilon}{k}\left(C_1 p_k - C_2 \rho\varepsilon\right) \tag{(b)}$$
$$\nabla \cdot \left(\left(\rho \boldsymbol{U}\boldsymbol{Y}_i\right) - \left(\boldsymbol{\Gamma}_i + \frac{\mu_t}{\sigma_{Y_i}}\right)\nabla\boldsymbol{Y}_i\right) = \dot{\omega}_i \tag{(b)}$$

 $f_D$  که U سرعت میانگین گاز، m نرخ انتقال جرم از ذرات،  $\mu$  ضریب لزجت دینامیکی،  $\mu_i$  ضریب لزجت جریان آشفته، p فشار،  $f_D$  نیروی پسا<sup>(</sup> ناشی از ذرات، H آنتالپی، K ضریب هدایت گرمایی،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه،  $\sigma_a$  عدد پرانتل مدل آشفته، p نرخ انتقال حرارت از ذرات، H آنتالپی، K ضریب هدایت گرمایی،  $p_a$  تولید آشفتگی ناشی از نیروهای لزج،  $\sigma_s$  عدد پرانتل نرخ انتقال حرارت از ذرات،  $\pi_s$  عدد پرانتل انرژی جنبشی آشفتگی،  $p_a$  تولید آشفتگی ناشی از نیروهای لزج،  $\sigma_s$  عدد پرانتل نرخ انتقال حرارت از ذرات،  $\sigma_s$  می ازد ان انرژی جنبشی آشفتگی،  $p_a$  تولید آشفتگی ناشی از نیروهای لزج،  $\sigma_s$  عدد پرانتل نرخ معران آندف آشفتگی،  $p_i$  تولید آشفتگی ناشی از نیروهای لزج،  $\sigma_s$  مدد پرانتل نرخ اندف آشفتگی، از فرات از خرات از خرات،  $\sigma_r$  و 2 ثوابت جریان آشفته،  $Y_i$  کسر جرمی نمونه جرمی  $I_i$ ،  $I_i$  پخش مولکولی نمونه جرمی  $I_i$ ،  $\sigma_r$  ثابت جریان آشفته و  $\sigma_i$  نرخ واکنش نمونه جرمی بر واحد حجم برای نمونه جرمی  $I_i$  ماست. همان طور که ذکر شد، برای جریان آشفته و i من از دو مدل احتراق اتلاف گردابه و مدل احتراق غیرپیش آمیخته استفاده شده است. در روش مدل احتراق غیرپیش آمیخته استفاده شده است. در مخلوط مدل احتراق زیر یش آمیخته معادله انتقال نمونه های جرمی (معادله (۶)) حل نمی شود و به جای آن، معادلات انتقال کسر مخلوط حرم (معادله (۶)) حل نمی شود و به جای آن، معادلات انتقال کسر مخلوط حرم مداند.

$$\nabla \cdot \left(\rho \boldsymbol{U} \boldsymbol{f}\right) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \boldsymbol{f}\right) + S \tag{Y}$$

$$\nabla \cdot \left(\rho \boldsymbol{U} \boldsymbol{f}^{,2}\right) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \boldsymbol{f}^{,2}\right) + C_g \mu_t \left(\nabla \boldsymbol{f}\right)^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \boldsymbol{f}^{,2} + S \tag{A}$$

که  $\overline{f}$  کسر مخلوط میانگین،  $\sigma_t$  ثابت و برابر ۵٬۸۵، S عبارت چشمه،  $\overline{f}$  واریانس کسر مخلوط میانگین،  $\sigma_c$  و  $C_a$  ثابت و بهترتیب برابر با ۲/۸۶ و ۲ هستند. ذرات زغال بهعنوان فاز پراکندهاند و قانون دوم نیوتن برای حرکت آنها به کار میرود. انتقال حرارت نیز شامل انتقال حرارت تشعشعی روی سطح ذرات زغال است. معاد کارت زغال بهترتیب بقای جرم، تکانه و انرژی در روابط (۹) تا (۱۱) آورده شدهاند.

$$\frac{dm_p}{dt} = -\dot{m} \tag{9}$$

$$m_p \frac{dr_p}{dt} = -f_D \tag{(1)}$$

$$m_p C_P \frac{dT_p}{dt} = -\dot{q} \tag{11}$$

که  $m_p$  جرم و  $U_p$  سرعت میانگین ذرات زغال است. تعریف ضریب لزجت جریان آشفته، نیروی پسا ناشی از ذرات، نرخ انتقال حرارت از ذرات، تولید آشفتگی ناشی از نیروهای لزج، ضریب درگ و کسر مخلوط در معادلات (۱) تا (۱۱)، بهترتیب، در معادلات (۱۲) تا (۱۷) نشان داده شده است.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{11}$$

1. Drag

$$-f_D = \frac{1}{8}\pi d_p^2 \rho C_D |\boldsymbol{U} - \boldsymbol{U}_p| (\boldsymbol{U} - \boldsymbol{U}_p)$$
(17)

$$-q = \pi d_p \lambda N u (T_g - T_p) + \sum \frac{dm_p}{dt} H_{reac} + A_p \varepsilon_p (\pi I - \sigma T_p^4)$$
(14)

$$p_k = (\mu + \mu_t) \nabla \boldsymbol{U} \cdot (\nabla \boldsymbol{U} + (\nabla \boldsymbol{U})^T)$$
(1 $\Delta$ )

$$C_D = \max(\frac{24(1+0.15Re^{0.007})}{Re}, 0.44)$$
(19)

$$f = \left(\frac{Y_i - Y_{i,ox}}{Y_{i,fuel} - Y_{i,ox}}\right) \tag{1Y}$$

که  $\mathcal{L}_{\mu}$  ثابت جریان آشفته،  $d_{p}$  قطر ذرات زغال،  $\mathcal{L}_{D}$  ضریب درگ بهدست آمده از رابطه اصلاحشده شیلر و نیومن[۱۶]، Nu عدد ناسلت،  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن،  $R_p$  سطح ذره،  $\varepsilon_p$  ضریب صدور، I شدت تشعشع،  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن،  $R_p$  عدد رینولدز و زیروندهای ox و fuel به ترتیب نشان دهنده المان اکسیدکننده و سوخت است. ].

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (\alpha + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega'$$
(1 $\wedge$ )  
 $\Omega'$  (1 $\wedge$ )  
 $\Omega'$  (1 $\wedge$ )  
 $\pi'$  r(cl( analy  $\pi'$  r) and  $\pi'$  r) and \pi' r) and  $\pi'$  r) and \pi' r) and  $\pi'$  r) and  $\pi'$  r) and  $\pi'$  r) and  $\pi'$  r) and \pi' r) and \pi' r) and  $\pi'$  r) and \pi' r) and  $\pi'$  r) and \pi' r) and \pi' r) and  $\pi'$  r) and \pi' r) and  $\pi'$  r) and \pi' r) and \pi'

تابع جامد و 
$$(\alpha + \sigma_s)$$
 ضخامت نوری است.  
مقادیر ثوابت جریان آشفته به کاررفته در این شبیه سازی، براساس مطالعه لاندر و اسپالدینگ[۱۷] بوده و به شرح زیر است.  
 $C_{\mu} = 0.09, \qquad \sigma_k = 1, \qquad \sigma_{\varepsilon} = 1.3$   
 $C_1 = 1.44, \qquad C_2 = 1.92, \qquad \sigma_H = 0.85$ 

#### نتايج شبيهسازي

#### اعتبارسنجى

لنظور تأييد روش حل انجام شده است. برای حصول اطمینان از درستی روش حل در ادامه سه اعتبارسنجی

Λ

#### اعتبار سنجى با نتايج تجربي

در این اعتبارسنجی، مقدار کسر جرمی دی کسیدکربن با نمونه آزمایشگاهی تجهیزات احتراق نیوکاسل و شبیهسازی انجامشده توسط لی و همکاران[۱۲] مقایسه شده است. برای شبیهسازی از مدل سادهشده تجهیزات احتراق نیوکاسل استفاده می شود که این مدل در شکل ۶ آورده شده است. با توجه به شکل ۶، محل ورود پودر زغال در مرکز استوانه است. پودر زغال با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه و دمای ۲۹۳ درجه کلوین وارد محفظه میشود، در حالی که اکسیژن غنی شده همراه با هوا با سرعت ۵۰ متر بر ثانیه و دمای ۱۳۹۳ درجه کلوین از اطراف محل ورود پودر زغال وارد می شود. به دلیل متقارن بودن هندسه، نیمی از آن برای شبیهسازی استفاده شده است. جدول ۲ آنالیزهای تقریبی و نهایی زغال مورد استفاده در شبیهسازی را نشان میدهد.

پس از آنکه فرایند احتراق پودر زغال به اتمام رسید، مقدار کسر جرمی دیاکسیدکربن تولیدشده در احتراق در سه نقطه A، B و C روی محور هندسه اندازه گیری شد و با کار لی و همکاران و نمونه آزمایشگاهی[۱۲] مقایسه شد. فاصله نقاط مذکور از محل ورودی پودر زغال بهترتیب برابر ۰/۳۳، ۶۲۶ و ۱/۰۳ متر است. برای یافتن اختلاف نسبی بین دادهها از رابطه (۱۹) استفاده میشود.

$$e = \frac{|x - x_{ref}|}{x_{ref}} \times 100 \tag{19}$$

<sup>1.</sup> Discrete ordinate

که x بیانگر مقدار پارامتر بهدست آمده از شبیهسازی حاضر و x<sub>ref</sub> بیانگر مقدار پارامتر بهدست آمده در کار لی و همکاران و نمونه آزمایشگاهی است. در جدول ۳ مقایسه نتایج شبیهسازی با کار لی و همکاران و نمونه آزمایشگاهی آورده شده است. همانطور که در جدول ۳ مشخص است، اختلاف نسبی بهدست آمده از مقایسه کار حاضر با کار لی و همکاران زیر ۷ درصد و در مقایسه با نمونههای آزمایشگاهی زیر ۱۳ درصد است که این امر نشان میدهد کار حاضر از مطابقت قابل قبولی برخوردار است.



جدول ۳– مقایسه کسر جرمی دیاکسیدکربن با کار لی و همکاران و نمونه آزمایشگاهی نیوکاسل[۱۲] able 3- Comparison of present work with li et al. simulation and tested results of CO2 mass fraction[12]

	Tuble b Comparison of present work with h et al. Simulation and tested results of CO2 mass fraction[12]							
Points	Present	Li et al.	Experimental	Comparison with li et	Comparison with			
TOIIIts	work	results	results	al. results (%)	experimental results (%)			
А	12.51	13.4	13.8	6.64	9.34			
В	14.76	14.5	15.6	1.79	5.38			
С	15.91	15.1	14.1	5.36	12.83			

### اعتبارسنجی با نتایج گو و همکاران

اعتبارسنجی دیگر مربوط به شبیهسازی سهبعدی احتراق پودر زغال درون دهانه لوله دمش کورهبلند است که توسط گو و همکاران[۱۹] انجام گرفت. آنها برای رژیم جریان از مدل جریان آشفته استاندارد k - k و برای انتقال حرارت تشعشعی از مدل DO استفاده کردند. هندسه شبیهسازی آنها در شکل ۷ آورده شده است. در ورودی هوای گرم با دبی ۹۶۱۱ نرمال متر مکعب بر ساعت و دمای ۱۴۹۳ درجه کلوین وارد شده و پودر زغال با دبی جرمی ۱۳۷۵ کیلوگرم بر ثانیه و دمای ۳۲۰ درجه کلوین، که از قسمت لانس با قطر ۱۹ میلیمتر است، وارد میشود. برای دیوارههای محفظه، فرض عدم لغزش و بی دررو درنظر گرفته شده است. هوای دم با اکسیژن غنیسازی شده است، به گونهای که بهازای هر ۱۰۰ متر مکعب هوا، ۸ متر مکعب اکسیژن



Figure 7- The geometry of tuyere in Gu *et al.* simulation[19] شکل ۲- هندسه دهانه لوله دمش کورهبلند در کار گو و همکاران[۱۹]

	Table 4- Proximate and ultimate analysis of pulverized coal (%)								
Ultimate analysis Proximate analysis									
S	N	0	Н	С	Moisture Ash Fixed carbon Volatile matte				
0.84	1.67	4.72	4.82	78.76	78.76 3.6 5.59 56.49 34.32				

جدول ۴- آنالیزهای تقریبی و نهایی پودر زغال برحسب درصد %) Table 4- Proximate and ultimate analysis of pulverized coal

شکل ۸ خطوط همدما حاصل از شبیهسازی را با نتایج گو و همکاران مقایسه می کند. با مشاهده شکل 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[۱۹]، نتیجه گرفته می شود که کار حاضر از اعتبار قابل قبولی برخوردار است.



Figure 8- Comparison isothermal lines of present work with Gu et al[19] شکل ۸- مقایسه خطوط همدما بهدست آمده از کار حاضر با کار گو و همکاران[۱۹]: الف) کار حاضر، ب)کار گو و همکاران[۱۹]

### اعتبارسنجي با نتايج تجربي كورهبلند ذوب آهن اصفهان

در اعتبارسنجی آخر، به مقایسه حداکثر دمای خروجی دهانه لوله دمش با دمای شبیه سازی شده و حداکثر فشار در ورودی هوای دم با فشار حاصل از شبیه سازی پرداخته می شود. بدین منظور، شبیه سازی احتراق گاز طبیعی بدون حضور پودر زغال در دهانه لوله دمش در کوره بلند ذوب آهن اصفهان صورت گرفت. هند سه دهانه لوله دمش کوره بلند به صورت طرحواره در شکل ۳ آورده شده است. همان گونه که در شکل نمایان است، هوا با دبی جرمی، درصد اکسیژن و دمای معین وارد شده و با گاز طبیعی طبق واکنش یک مرحله ای (۲۰) واکنش می دهد و به کوره بلند وارد می شود. (۲۰)

بس از انجام شبیهسازی، بیشترین دمای بهدست آمده در خروجی برابر ۲۱۳۳/۴۸ درجه سلسیوس است که خطای آن طبق رابطه (۱۹) در مقایسه با کمترین دمای مطلوب (۱۹۵۰ درجه سلسیوس) برابر ۹/۴ درصد و بیشترین دمای مطلوب خروجی (۲۱۰۰ درجه سلسیوس) برابر ۱/۵۹ درصد است. علاوهبر حداکثر دمای خروجی، فشار در ورودی دهانه لوله دمش نیز اندازه گیری شد. پس از انجام شبیهسازی، بیشترین فشار در ورودی هوای دم برابر ۱۹۸۶ پاسکال (۱/۹۶ اتمسفر) بهدست آمد که خطای آن طبق رابطه (۱۹) در مقایسه با فشار ورودی خوانده شده در اطاق کنترل کوره بلند (۱/۹۶ اتمسفر) برابر با ۲۱۱ اتمسفر) برابر با ۶/۶۴ درصد است. ملاحظه می شود که خطا هم در دمای خروجی و هم در فشار ورودی نسبت به اطلاعات تجربی زیر ۱۰ درصد است. و این نکته نشان می دهد که کار حاضر از مطابقت قابل قبولی برخوردار است.

## معیار همگرایی و روش حل عددی

معیار همگرایی برای تمامی معادلات <sup>۵۰</sup> ۱۰۰ است و تعداد ۲۰۰۰ تکرار در نرمافزار درنظر گرفته شده است. الگوریتم مورد استفاده برای حل، سیمپل و برای معادلات تکانه، انرژی، کسر مخلوط میانگین، واریانس کسر مخلوط و نمونههای جرمی از طرح بالادست مرتبه دوم و برای معادلات انرژی جنبشی آشفتگی، نرخ اتلاف آشفتگی و انتقال حرارت تشعشعی از طرح بالادست مرتبه اول استفاده شده است.

## گاز طبيعي بهعنوان سوخت کورهبلند

اولین حالت برای شبیه سازی، درنظر گرفتن گاز طبیعی به عنوان سوخت کمکی کورهبلند در دهانه لوله دمش است. در این حالت، پودر زغال وجود ندارد و هوای دم با دمای بالا و درصد اکسیژن مشخص وارد شده و با گاز طبیعی واکنش انجام میدهد. در ادامه شرایط مرزی، استقلال از شبکه و تأثیر پارامترهای دمش در این حالت بررسی شده است.

## شرايط مرزى

برای انجام شبیهسازی، از شرایط کورهبلند در حالت ایدئال استفاده شده است. این شرایط در جدول ۵ آورده شده است. این شرایط مرزی برای کل کورهبلند و ۲۶ عدد دهانه لوله دمش است. همچنین، شرایط مرزی مدل آشفتگی در تمام حالات، شدت آشفتگی و قطر هیدرولیکی انتخاب شده است. شدت آشفتگی در ورودی هوای دم برابر ۳/۴ درصد، در ورودی گاز طبیعی برابر ۳/۲ درصد و در خروجی ۵ درصد است.

	-		•
Boundary conditions		Operational condition	
Blast air	Mass flow rate $\left(\frac{m^3}{min}\right)$	Temperature (C)	Oxygen content (%)
Diust un	3500	1080	27.5
Natural gas	Mass flow rate $(\frac{m^3}{h})$	Temperature (C)	-
	19000	20	-
Outlet	Pressure outlet (atm)	-	-
	2.8		-
Walls	Adiabatic		-

#### جدول ۵- شرایط ایدئال عملکرد کورهبلند ذوبآهن اصفهان در حالت گاز طبیعی Table 5- Ideal Operational condition of Esfahan steel blast furnace in natural gas case

### استقلال از شبکه

(%)

6

0.001

قبل از انجام شبیهسازی، استقلال از شبکه مورد بررسی قرار گرفت که در جدول ۶ آورده شده است. برای استقلال از شبکه در نقطهای به مختصات x = 0.125 متر و روی محور مرکزی دهانه لوله دمش پارامتر دما برحسب درجه کلوین اندازه گیری شده است. جدول نشان میدهد که با کاهش اندازه المان، درصد اختلاف نسبی پارامتر دما کمتر میشود که برای شبیهسازی از حالت ۴ با اختلاف نسبی ۰/۰۰۱ درصد استفاده می شود.

		Table 6- Grid	l study in natural gas case	2	
ode	Element size (mm)	Number of nodes	Number of elements	Temperature (K)	Error (
1	8	24038	129838	1345.3	0.37
2	6	55304	306149	1350.35	0.16
3	4.5	128248	723414	1352.63	0.02

1028795

1532644

181235

268344

М

4

4

3.5

# جدول ۶- تحلیل استقلال از شبکه در حالت گاز طبیع

#### خطوط همدما، فشارثابت و کانتور سرعت در حالت گاز طبیعی

1352.96

1352.97

بهمنظور نمایش توزیع دما، فشار و سرعت، خطوط همدما، فشارثابت و کانتور سرعت در شرایط ایدئال عملکرد کورهبلند (جدول ۵) در شکل ۹ آورده شده است. همان طور که در شکل مشخص است، گاز بهمحض ورود به محفظه با هوای دم واکنش داده و در خروجی به بیشترین دما و سرعت میرسد.



Figure 9- Isothermal lines, isobar lines and velocity contour in natural gas case شکل ۹- خطوط همدما، فشار ثابت و کانتور سرعت در حالت گاز طبیعی: الف) خطوط همدما، ب) خطوط فشار ثابت، ج) کانتور سرعت

## تأثیر درصد اکسیژن در هوای دم

بهمنظور بررسی اثر درصد اکسیژن در هوای دم، شبیهسازی در درصدهای اکسیژن ۲۱، ۲۳، ۲۵، ۲۶، ۲۷/۵ و ۳۵ در نقاط درنظر گرفتهشده برای دما و سرعت میانگین در مقطع خروجی، که با رنگ قرمز در شکل ۱۰ نشان داده شدهاند، انجام گرفته است و نتایج آن بهصورت تغییرات حداکثر دمای خروجی<sup>۱</sup> و دمای میانگین نقاط در خروجی<sup>۲</sup> در شکل ۱۱ و تغییرات حداکثر سرعت خروجی<sup>۳</sup> و سرعت میانگین نقاط در خروجی<sup>1</sup> در شکل ۱۲ آورده شده است.

ذکر این نکته لازم است که درصدهای اکسیژن یادشده، درصدهای مورد استفاده در هوای دم در کورهبلند ذوبآهن است. نتایج نشان میدهد که افزایش درصد اکسیژن موجود در هوای دم باعث افزایش دمای خروجی میشود[۲۰]؛ بهدلیل 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 جنبوجوش بیشتر نمونههای جرمی میشود که افزایش سرعت در خروجی را بههمراه دارد.



Figure 11- Outlet temperature changes in terms of increasing oxygen content in natural gas case شکل ۱۱- تغییرات دمای خروجی برحسب افزایش درصد اکسیژن در حالت گاز طبیعی

1. Max.T outlet

2. Ave.T points

3. Max.V outlet

4. Ave.V points



Figure 12- Outlet velocity changes in terms of increasing oxygen content in natural gas case شکل ۱۲- تغییرات سرعت خروجی برحسب افزایش درصد اکسیژن در حالت گاز طبیعی

تأثیر دمای هوای دم

پارامتر دیگر مورد بررسی افزایش دمای هوای دم ورودی به کورهبلند است. بدین منظور، شبیهسازی در شرایط مرزی ایدئال کورهبلند با پنج دمای ۹۰۰، ۱۰۸۰، ۱۰۸۰، ۱۲۰۰ و ۱۳۰۰ درجه سلسیوس انجام گرفته است و نتایج آن بهصورت تغییرات دما و سرعت خروجی برحسب دمای هوای دم بهترتیب در شکلهای ۱۳ و ۱۴ آورده شده است. نتایج نشان میدهد که افزایش دمای هوای دم باعث افزایش انرژی گازهای داغ شده که این افزایش انرژی، افزایش دما و سرعت در خروجی را نتیجه میدهد[۲۰].



Figure 13- Outlet temperature changes in terms of increasing blast air temperature in natural gas case شکل ۱۳ تغییرات دمای خروجی برحسب افزایش دمای هوای دم در حالت گاز طبیعی



Figure 14- Outlet velocity changes in terms of increasing blast air temperature in natural gas case شکل ۱۴– تغییرات سرعت خروجی برحسب افزایش دمای هوای دم در حالت گاز طبیعی

### پودر زغال بهعنوان سوخت کورهبلند

دومین حالت برای شبیهسازی درنظر گرفتن پودر زغال بهعنوان سوخت کمکی کورهبلند در دهانه لوله دمش است. در این حالت، گاز طبیعی از شبیهسازی حذف شده و هوای دم با دمای بالا و درصد اکسیژن مشخص وارد محفظه شده و با پودر زغال واکنش انجام میدهد. در ادامه شرایط مرزی، استقلال از شبکه و تأثیر پارامترهای دمش در این حالت بررسی شده است.

#### شرايط مرزى

شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه سازی برای حالت پودر زغال به عنوان سوخت کوره بلند در جدول ۷ آورده شده است. این شرایط مرزی برای کل کوره بلند و ۲۶ عدد دهانه لوله دمش است. شدت آشفتگی در ورودی هوای دم برابر ۱۰ درصد و در ورودی پودر زغال و خروجی دهانه لوله دمش برابر ۳ درصد است. شایان ذکر است که احتراق پودر زغال در شرایط ایدئال کوره و با دبی جرمی پودر زغال فرضی، ۵۰ کیلوگرم بر ساعت بر هر دهانه لوله دمش، انجام گرفته است.

Boundary conditions	Operational condition				
Blast air	Mass flow rate $\left(\frac{m^3}{min}\right)$	Temperature (C)	Oxygen content (%)		
	3500	1080	27.5		
Pulverized coal	Mass flow rate $\left(\frac{Kg}{h}\right)$	Temperature (C)	-		
	50	27	-		
Outlat	Pressure outlet (atm)	-	-		
Outlet	2.8	-	-		
Walls	Adiabatic	-	-		

جدول ۷- شرایط ایدئال عملکرد کورهبلند ذوب آهن اصفهان در حالت پودر زغال Table 7- Ideal Operational condition of Esfahan steel blast furnace in pulverized coal case

زغال مورد استفاده در کار حاضر زغال کارمزد است که بهدلیل داشتن مواد فرار بالا گزینه خوبی برای تزریق داخل کوره است[۸]. آنالیزهای تقریبی و نهایی زغال کارمزد در جدول ۸ آورده شده است. با استفاده از این آنالیزها ضرایب استوکیومتری واکنش گازی احتراق پودر زغال بهدست میآید که در واکنش (۲۱) قابل مشاهده است.

Ult	imate ana	lysis	Proximate analysis			S
S	Н	С	Moisture	Ash	Fixed carbon	Volatile matter
1	4.3	70.1	11	10	45	34

جدول ۸ – آنالیزهای تقریبی و نهایی پودر زغال کارمزد برحسب درصد[۸] [8](%) Table 8- Proximate and ultimate analysis of Karmozd coal

 $\mathrm{C_{2.24}H_{2.93}N_{0.0012}+2.97O_2} \rightarrow 2.24\mathrm{CO_2}+1.462\mathrm{H_2O}+0.0006\mathrm{N_2}$ 

استقلال از شبکه

(71)

استقلال از شبکه در این حالت برای پارامتر دما در نقطهای به مختصات x = 0.096 متر و روی محور مرکزی دهانه لوله دمش در جدول ۹ آورده شده است. جدول نشان میدهد که با کاهش اندازه المان، درصد اختلاف نسبی پارامتر دما کمتر میشود که برای شبیهسازی از حالت ۴ با اختلاف نسبی ۵ درصد استفاده میشود.

Mode	Element size (mm)	Number of nodes	Number of elements	Temperature (K)	Error (%)
1	8	23990	129617	550.379	15.711
2	6	55443	306903	463.907	9.41
3	4.5	128589	725624	420.24	6.74
4	4	181809	1032539	391.905	5
5	3.5	269204	1538081	369.687	-

جدول ۹– تحلیل استقلال از شبکه در حالت پودر زغال Table 9- Grid study in pulverized coal case

### خطوط همدما، فشارثابت و کانتور سرعت در حالت پودر زغال

بهمنظور نمایش توزیع دما، فشار و سرعت، خطوط همدما، فشارثابت و کانتور سرعت در شرایط ایدئال عملکرد کورهبلند (جدول ۷) در شکل ۱۵ آورده شده است. با توجه به شکل، توزیع دما، بهدلیل قرارگرفتن ورودی پودر زغال در مرکز ورودی، متقارن است. بیشترین و کمترین مقدار فشار نیز در ورودی و خروجی لوله دمش است. سرعت در خروجی بیشترین مقدار را داراست، ولی یکنواخت نیست، بهطوری که سرعت در مرکز خروجی تحت تأثیر سرعت سوخت قرار می گیرد.

## تأثیر درصد اکسیژن در هوای دم

افزایش درصد اکسیژن در هوای دم در حالت پودر زغال نیز، همانند حالت گاز طبیعی بررسی شده است و نتایج آن بهصورت تغییرات دما و سرعت در خروجی بهترتیب در شکلهای ۱۶ و ۱۷ آورده شده است. 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 مییابد نیتروژن کمتر وجود داشته و باعث افزایش دمای شعله میشود، ولی بهدلیل کمتربودن ارزش حرارتی پودر زغال نسبت به گاز طبیعی به دمای کمتری نسبت به گاز طبیعی میرسد. همان طور که در شکل ۱۷ نمایان است، افزایش درصد اکسیژن در این حالت روی سرعت اثر بسیار کمی دارد، به گونه ای که سرعت در خروجی افزایش یافته است، ولی این افزایش بسیار ناچیز است.



Figure 15- Isothermal lines, isobar lines and velocity contour in pulverized coal case شکل ۱۵– خطوط همدما، فشار ثابت و کانتور سرعت در حالت پودر زغال: الف) خطوط همدما، ب) خطوط فشار ثابت، ج) کانتور سرعت

احمدرضا رحمتي و بهروز آقائي



Figure 16- Outlet temperature changes in terms of increasing oxygen content in pulverized coal case شکل ۱۶- تغییرات دمای خروجی برحسب افزایش درصد اکسیژن در حالت پودر زغال



شکل ۱۷- تغییرات سرعت خروجی برحسب افزایش درصد اکسیژن در حالت پودر زغال

## تأثیر دمای هوای دم

تأثیر افزایش دمای هوای دم در حالت پودر زغال نیز همانند حالت گاز طبیعی بررسی شده است. بدین منظور، شبیهسازی در شرایط مرزی عملکرد کورهبلند با پنج دمای ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۰۸۰ و ۱۳۰۰ درجه سلسیوس انجام گرفته است و نتایج آن بهصورت تغییرات دمای خروجی برحسب دمای هوای دم در شکل ۱۸ و تغییرات سرعت خروجی برحسب دمای هوای دم در شکل ۱۹ آورده شده است. نتایج نشان میدهد که افزایش دمای هوای دم باعث افزایش انرژی گازهای داغ شده که این افزایش انرژی، افزایش دما و سرعت در خروجی را نتیجه میدهد. پایین تر بودن حداکثر دمای خروجی پودر زغال نسبت به حداکثر دمای خروجی گاز طبیعی بهدلیل تفاوت در ارزش حرارتی پودر زغال نسبت به گاز طبیعی است.



Figure 18- Outlet temperature changes in terms of increasing blast air temperature in pulverized coal case شكل 14- تغییرات دمای خروجی برحسب افزایش دمای هوای دم در حالت پودر زغال



Figure 19- Outlet velocity changes in terms of increasing blast air temperature in pulverized coal case شکل ۱۹- تغییرات سرعت خروجی برحسب افزایش دمای هوای دم در حالت پودر زغال

گاز طبیعی و پودر زغال بهعنوان سوخت کورهبلند

سومین حالت شبیه سازی درنظر گرفتن گاز طبیعی و پودر زغال به عنوان سوخت های کمکی کوره بلند است. در این حالت، هوای دم با دمای بالا و درصد اکسیژن مشخص وارد محفظه شده و هم با گاز طبیعی و هم با پودر زغال واکنش انجام می دهد.

#### شرایط مرزی

شرایط مرزی مورد استفاده، در حالت دو سوخت کمکی همزمان، در جدول ۱۰ آورده شده است. این شرایط مرزی برای کل کورهبلند و ۲۶ عدد دهانه لوله دمش است. شدت آشفتگی در ورودی هوای دم برابر ۱۰ درصد، در ورودی گاز طبیعی، ورودی پودر زغال و خروجی دهانه لوله دمش ۵ درصد است. شایان ذکر است که احتراق پودر زغال در شرایط ایدئال کوره و با دبی جرمی فرضی پودر زغال، ۲۰ کیلوگرم بر ساعت، انجام گرفته است.

Boundary conditions	Operational condition				
Blast air	Mass flow rate $(\frac{m^3}{min})$	Temperature (C)	Oxygen content (%)		
	3500	1080	27.5		
Natural gas	Mass flow rate $\left(\frac{m^3}{h}\right)$	Temperature (C)	-		
Tratalar gas	19000	20	-		
Pulverized coal	Mass flow rate $\left(\frac{Kg}{h}\right)$	Temperature (C)	-		
	20	27	-		
Outlat	Pressure outlet (atm)	-	-		
Outlet	2.8	-	-		
Walls	Adiabatic	-	-		

جدول ۱۰- شرایط ایدئال عملکرد کورهبلند ذوب آهن اصفهان در حالت گاز طبیعی و پودر زغال Table 10- Ideal Operational condition of Esfahan steel blast furnace in natural gas and pulverized coal case

#### استقلال از شبکه

استقلال از شبکه در این حالت در جدول ۱۱ آورده شده است. برای استقلال از شبکه در نقطهای به مختصات x = 0.125 متر و روی محور مرکزی دهانه لوله دمش پارامتر دما برحسب درجه کلوین اندازه گیری شده است. برای شبیهسازی، از حالت ۴ با اختلاف نسبی ۰/۰۳ درصد استفاده می شود.

Mode	Element size (mm)	Number of nodes	Number of elements	Temperature (K)	Error (%)
1	8	23995	129528	1373.39	0.8
2	6	55237	305725	1361.3	0.41
3	4.5	128110	722155	1355.67	0.0324
4	4	181063	1027288	1355.23	0.003
5	3.5	268150	1531079	1354.81	-

جدول ۱۱– تحلیل استقلال از شبکه در حالت گاز طبیعی و پودر زغال Table 11- Grid study in natural gas and pulverized coal case

### خطوط همدما، فشار ثابت و کانتور سرعت در حالت گاز طبیعی و پودر زغال

برای نمایش توزیع دما، فشار و سرعت، خطوط همدما، فشارثابت و کانتور سرعت در شرایط ایدئال عملکرد کورهبلند (جدول ۱۰) در شکل ۲۰ آورده شده است.

شایان ذکر است که دلیل نمایش کانتورها بهصورت مقطع، عدم قرارگیری ورودیهای گاز طبیعی و پودر زغال در یک صفحه است. نکته قابل توجه این است که با شرایط ایدئال کورهبلند و دبی جرمی فرضی پودر زغال، ناحیهای دمابالا روی دیواره پایینی دهانه لوله دمش ظاهر میشود که ممکن است سبب سوختگی و فرسایش در این ناحیه شود.

ج) کانتور سرعت

٢٣

Figure 20- Isothermal lines, isobar lines and velocity contour in natural gas and pulverized coal case شکل ۲۰– خطوط هم دما، فشار ثابت و کانتور سرعت در حالت گاز طبیعی و پودر زغال: الف) خطوط هم دما، ب) خطوط فشار ثابت،



## تأثیر درصد اکسیژن در هوای دم

بهمنظور یافتن اثر درصد اکسیژن هوای دم روی توزیع دما و سرعت خروجی، درصدهای اکسیژن ۲۱، ۲۳، ۲۵، ۲۶، ۲۷/۵ و ۳۵ شبیهسازی شدهاند و نتایج آنها بهصورت نمودارهای تغییرات دمای خروجی در شکل ۲۱ و تغییرات سرعت خروجی در شکل ۲۲ آورده شده است. شرایط مرزی مورد استفاده در این حالت، شرایط ذکرشده در جدول ۱۰ است و فقط درصدهای اکسیژن در هوای دم افزایش مییابد. همانند دو حالت قبل نتایج نشان میدهد افزایش درصد اکسیژن موجود در هوای دم باعث افزایش دما و سرعت خروجی میشود.







Figure 22- Outlet velocity changes in terms of increasing oxygen content in in natural gas pulverized coal case شکل ۲۲- تغییرات سرعت خروجی برحسب افزایش درصد اکسیژن در حالت گاز طبیعی و پودر زغال

### تأثیر دمای هوای دم

تأثیر افزایش دمای هوای دم در پنج دمای ۹۰۰، ۹۰۰، ۱۰۸۰، ۱۲۸۰ و ۱۳۰۰ درجه سلسیوس شبیهسازی شده است و نتایج آن بهصورت نمودارهای تغییرات دما و سرعت خروجی در شکلهای ۲۳ و ۲۴ آورده شده است. نتایج نشان میدهد که افزایش دمای هوای دم همانند دو حالت قبل باعث افزایش انرژی گازهای داغ شده که افزایش دما و سرعت در خروجی را نتیجه میدهد.



Figure 23- Outlet temperature changes in terms of increasing blast air temperature in natural gas and pulverized coal case شكل ٢٣- تغييرات دماى خروجى برحسب افزايش دماى هواى دم در حالت گاز طبيعى و پودر زغال



Figure 24- Outlet velocity changes in terms of increasing blast air temperature in natural gas and pulverized coal case شكل ۲۴- تغييرات سرعت خروجى برحسب افزايش دماى هواى دم در حالت گاز طبيعى و پودر زغال

## نتيجهگيرى

در کار حاضر، شبیهسازی سهبعدی احتراق پودر زغال در دهانه لوله دمش کورهبلند در کارخانه ذوب آهن اصفهان در حالت پایا با استفاده از نرمافزار انسیس فلوئنت ۱۶ انجام گرفت. در حالت اول، شبیهسازی برای گاز طبیعی بدون حضور پودر زغال انجام پذیرفت و اثر افزایش اکسیژن در هوای دم و اثر تغییر دمای هوای دم در خروجی دهانه لوله دمش بررسی شد. پس از آن در حالت دوم، گاز طبیعی حذف و رفتار پودر زغال بهتنهایی در دهانه لوله دمش شبیهسازی شد. در حالت سوم هم، احتراق ترکیب سوختهای گاز طبیعی و پودر زغال و اثر پارامترهای دمش بررسی شد. پس از انجام شبیهسازی نتایج زیر حاصل شدند: ۱) استفاده از سوختهای کمکی نظیر گاز طبیعی و پودر زغال در کورهبلند علاوهبر کمکردن هزینه تولید چدن مذاب، مزیتهای دیگری ازقبیل کاهش مصرف کک متالوژی گرانقیمت را بههمراه دارد. همچنین، از انتشار گازهای آلاینده ناشی از تولید کک جلوگیری میکند که گامی برای بهبود شرایط زیستمحیطی است.

۲) افزایش درصد اکسیژن در تمامی حالات، افزایش دما و سرعت در خروجی را نتیجه میدهد. این افزایش دما و سرعت ناشی از کمترشدن نیتروژن و بهمراتب افزایش اکسیژن در مقدار ثابت هوای دم است.

۳) بیشترین مقدار افزایش دما و سرعت خروجی ناشی از افزایش درصد اکسیژن مربوط به حالت سوم، یعنی گاز طبیعی و پودر زغال با مقدار ۱۵، است.

۴) افزایش دمای هوای دم در تمامی حالات، بهدلیل افزایش انرژی گازهای ورودی، افزایش دما و سرعت در خروجی را نتیجه میدهد.

۵) بیشترین مقدار افزایش دمای خروجی ناشی از افزایش دمای هوای دم مربوط به حالت سوم، یعنی گاز طبیعی و پودر زغال با مقدار ۲۰ درصد و بیشترین مقدار سرعت خروجی مربوط به حالت دوم، یعنی پودر زغال با مقدار ۳۱ درصد، است.

۶) استفاده از شرایط مرزی ایدئال دهانه لوله دمش ازقبیل دبی جرمی هوای دم، دبی جرمی گاز طبیعی و دبی جرمی فرضی پودر زغال، باعث ایجاد ناحیه دمابالا (حدود ۲۵۰۰ تا ۲۸۰۰ درجه کلوین بسته به شرایط) روی دیواره دهانه لوله دمش می شود که ممکن است باعث سوختگی و فرسایش در این ناحیه شود.

۷) در شرایط عملکرد یکسان کوره، استفاده از پودر زغال بهعنوان سوخت کوره دمای خروجی کمتری را نسبت به استفاده از گاز طبیعی نتیجه میدهد. این اختلاف دما ناشی از کمتربودن ارزش حرارتی پودر زغال نسبت به گاز طبیعی است.

## تشکر و قدردانی

در پایان، از پرسنل محترم شرکت ذوب آهن اصفهان در معاونت پژوهش، فناوری و بومی سازی، جناب آقای مهندس جلال آقابابا، مدیر پژوهش، فناوری و بومی سازی و جناب آقای مهندس سعید جعفری، معاون مدیر پژوهش، فناوری و بومی سازی و کلیه پرسنل و کارشناسان زحمت کش بخش کوره بلند شرکت ذوب آهن اصفهان که زمینه انجام این تحقیق را فراهم کردند نهایت تشکر و قدردانی را می شود.

## منابع

- 1. http://www.hosco.ir/fa, Accessed 20 April 2016.
- H. Fathi and A. Saboonchi, "Analysis and thermodynamic modeling to increase efficiency and reduce consumption of blast furnace coke," Msc Thesis, Department Of Mechanical Engineering, Isfahan University and Technology, Isfahan, 2011. (In Persian)
- 3. C. Zhou, *CFD modeling for high rate pulverized coal injection (PCI) in the blast furnace*, Overview of project, Purdu University Calumet, Hommond, 2005.
- 4. A. Jannati and D. Saber, "Overview of blast furnace pulverized coal injection," *First Emerging Trends In Energy Conservation*, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, 2011. (In Persian)
- 5. C. W. Chen, "Numerical analysis for the multi-phase flow of pulverized coal injection inside blast furnace tuyere," *Applied Mathematical Modelling*, 29, 2005, pp.871-884.
- 6. Z. Zhao, H. Tang, Q. Quan, J. Zhang and S. Shia, "Simulation study on performance of novel oxygen-coal lances for pulverized coal combustion in blast furnace tuyere," *Procedia Engineering*, 102, 2015, pp. 1667-1676.
- 7. S. Zhang, C. Bai, L. Wen, G. Que and X. Lue, "Gas-particle flow and combustion characteristics of pulverized coal injection in blast furnace raceway," *Journal of iron and steel research*, 10, 2010, pp. 8-12.
- 8. Sh. Raygan, H. Abdizadeh and H. Eskandari Rizi, "Evaluation of four coals for blast furnace pulverized coal injection," *Journal of iron and steel research*, 3, 2010, pp. 8-12.

- 9. Y. S. Shen, B. Y. Gue, A. B. Yu, P. R. Austin and P. Zhuli, "Three-dimensional modelling of in-furnace coal/coke combustion in a blast furnace," *Fuel*, 90, 2011, pp. 728-738.
- 10. C. P. Yeh, S. W. Du, C. H. Tsai and R. J. Yang, "Numerical analysis of flow and combustion behavior in tuyere and raceway of blast furnace fueled with pulverized coal and recycled top gas," *Energy*, 42, 2012, pp. 233-240.
- 11. J. A. Castro, G. M. Araujoa, I. O. Motaa, Y. Sasakib and J. Yagi, "Analysis of the combined injection of pulverized coal and charcoal into large blast furnaces," *Journal of materials research and technology*, 4, 2013, pp. 308-314.
- 12. Y. Li, X. Zhang, J. Zhao and H. Yan, "Numerical simulation and optimization of pulverized coal injection with enriched oxygen into blast furnace," *Applied Thermal Engineering*, 67, 2014, pp. 72-79.
- 13. S. W. Du, C. P. Yeh, W. H. Chen, W. H. Tsai and J. A. Lucas, "Burning characteristics of pulverized coal within blast furnace raceway at various injection operations and ways of oxygen enrichment," *Fuel*, 143, 2015, pp. 98-106.
- 14. Y. S. Shen and A. B. Yu, "Modelling of injecting a ternary coal blend into a model iron making blast furnace," *Minerals Engineering*, 90, 2016, pp. 89-95.
- 15. J. Liao, A. Yu and Y. Shen, "Modelling the injection of upgraded brown coals in an iron making blast furnace," *Powder Technology*, 314, 2016, pp. 550-556.
- 16. Y. Shen, B. Guo, A. Yu, D. Maladonado, P. Austin and P. Zuli, "Three dimensional modelling of coal combustion in blast furnace," *ISIJ international*, 48, 2008, pp. 777-786.
- 17. B. E. Launder and D. B. Spalding, "The numerical computation of turbulent flows," Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering, 3, 1974, pp. 269-289.
- 18. Ansys-Fluent-Theory guide.
- 19. M. Gu, G. Chen, M. Zhang, D. Huang, P. Chaubal and C. Zhou, "Three dimensional simulation of the pulverized coal combustion inside blast furnace tuyere," *Applied Mathematical Modelling*, 34, 2010, pp. 3536-3546.
- 20. Y. Shen, B. Guo, A. Yu and P. Zulli, "Model study of effects of coal properties & blast conditions on pulverized coal combustion," *ISIJ International*, 49, 2009, pp. 819-826.

#### **English Abstract**

## Three-dimensional simulation of the pulverized coal combustion inside tuyere of a blast furnace in Esfahan Steel Company

#### AhmadReza Rahmati<sup>1</sup>\* and Behrooz Aghaie<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, ar\_rahmati@kashanu.ac.ir 2- Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, b\_aj\_mechaniceng@yahoo.co \*Corresponding author

(Received: 2017.11.11, Received in revised form: 2018.02.02, Accepted: 2018.02.22)

In the present study, a steady state three-dimensional simulation of the pulverized coal combustion inside tuyere of a blast furnace in presence of natural gas in Esfahan Steel Company has been investigated and the effects of the blast air parameters, such as the oxygen percentage and temperature of the blast air at the outlet of the tuyere has been investigated. Auxiliary fuels in the blast furnace are used to increase productivity, reduce production costs and increase efficiency in the steel industry. In the first case, the simulation is carried out without the pulverized coal and only natural gas was considered. In the second case, the gas is removed and the combustion behavior of pulverized coal is simulated. The combustion model used for these cases is non-premixed combustion. In the third case, combustion behavior of natural gas and pulverized coal together is simulated using the eddy dissipation model. The results show that increasing the oxygen content and the blast air temperature increases the maximum temperature and maximum velocity at the outlet. The standard  $\mathbf{k} - \boldsymbol{\varepsilon}$  model is used for turbulence and the DO radiation model solves the radiative heat transfer equation.

Keywords: Pulverized coal, Blast furnace, Tuyere, Non-premixed combustion, Eddy dissipation combustion