

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

احمدرضا رحمتی<sup>۱\*</sup> و بهروز آقائی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ar\_rahmati@kashanu.ac.ir

۲- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، b\_aj\_mechaniceng@yahoo.co

\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۶/۸/۲۰، 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 پایه 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 پودر زغال انجام گرفته است و فقط گاز طبیعی به عنوان سوخت در نظر گرفته شده است. در حالت دوم، گاز طبیعی حذف شده و رفتار پودر زغال به تنهایی در دهانه لوله دمش شبیه‌سازی شده است. مدل احتراقی مورد استفاده برای دو حالت یادشده، مدل احتراق غیر آمیخته است. در حالت سوم، احتراق ترکیب سوخت‌های گاز طبیعی و پودر زغال در دهانه لوله دمش با استفاده از مدل احتراق اتلاف گردابه شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد اکسیژن و دمای هوای دم در هر سه حالت، افزایش دما و سرعت در خروجی لوله دمش را نتیجه می‌دهد. برای مدل‌سازی جریان آشفته از مدل استاندارد  $k - \epsilon$  و برای انتقال حرارت تشعشعی ناشی از گازهای داغ، از مدل DO استفاده شده است.

**کلیدواژگان:** پودر زغال، کوره‌بلند، دهانه لوله دمش، احتراق غیر آمیخته، احتراق اتلاف گردابه

### مقدمه

امروزه، یکی از اساسی‌ترین پایه‌های اقتصادی و اجتماعی کشورهای جهان را صنایع آهن و فولاد تشکیل می‌دهد و این به سبب 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 به صورت آلیاژهای مختلف، اساس تکنولوژی ماشین‌آلات را تشکیل می‌دهد [۱]. با توجه به تنوع موارد استفاده فولاد در دنیا و گسترده شدن 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 ارزان‌تر با توجه به محیط جغرافیایی خود کرده‌اند. امروزه، فناوری‌های مورد استفاده در تولید محصولات فولادی در مراحل بعد از به‌دست آوردن فولاد مذاب، یعنی ریخته‌گری 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 ذوب آهن اصفهان انجام می‌شود؛ ب) احیای مستقیم سنگ آهن و ذوب آهن اسفنجی و قراضه در کوره‌های الکتریکی، از قبیل قوس الکتریکی نظیر فولاد خوزستان یا کوره‌های القایی

1. 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 می‌آید. در مرحله بعد، آهن خام در یک میدل به فولاد مذاب تبدیل شده، کربن و ناخالصی‌های دیگر آن به کمک اکسیژن خارج و فولاد خام تولید می‌شود. روش دوم تولید فولاد استفاده از کوره‌های الکتریکی و ذوب مجدد قراضه آهن و فولاد است. به دلیل کمبود منابع قراضه در جهان و نیز رشد فزاینده قیمت آن در طول سال‌های گذشته، در این روش، می‌توان به همراه قراضه از آهن اسفنجی نیز برای ذوب در کوره استفاده کرد [۲]. همان‌طور که ذکر شد، روش تولید فولاد در کارخانه ذوب آهن اصفهان شیوه سنتی تولید است؛ یعنی از احیای غیرمستقیم آهن استفاده می‌شود. کوره بلند یکی از بخش‌های 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 طرحواره‌ای ساده از کوره بلند را نمایش می‌دهد. مهم‌ترین فرایندی که در کوره بلند انجام می‌شود احیای اکسیدهای آهن، ذوب آهن خام و جدایش آن از ناخالصی‌هاست. سنگ آهن، زغال و سنگ آهک از بالای کوره وارد شده و هوای پیش‌گرم از کف دمیده می‌شود. هوای داغی که به کف کوره دمیده می‌شود، طی زمان ۶ تا ۸ ثانیه بعد از انجام واکنش‌های شیمیایی زیاد، به بالای کوره صعود می‌کند.

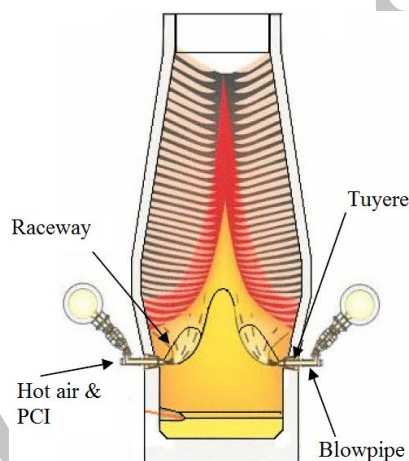


Figure 1- Schematic representation of blast furnace[3]

شکل ۱- طرحواره‌ای از کوره بلند [۳]

در سال‌های اخیر، تلاش‌های قابل ملاحظه‌ای به منظور افزایش قابلیت تولید کوره بلند انجام گرفته است. استفاده از سوخت‌های کمکی در کوره بلند به منظور افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌های تولید و بالابردن بازده در اکثر نقاط دنیا در صنایع فولادسازی استفاده می‌شود. یکی از سوخت‌های کمکی مورد استفاده در کوره بلند 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 می‌شود. انتخاب سوخت کمکی همچون گاز طبیعی، نفت، زغال و سایر مواد کربنی جهت تزریق به کوره بلند بر پایه عوامل اقتصادی صورت می‌گیرد. چرا که به کارگیری هر یک از مواد سوختی می‌تواند از مصرف کک متالورژی، که بخش عمده‌ای از قیمت تمام شده چدن مذاب تولیدی را شامل می‌شود، بکاهد، مخارج مرتبط با باتری‌های کک‌سازی موجود و سرمایه‌گذاری برای ایجاد باتری‌های جدید کک‌سازی را (به دلیل کاهش مصرف کک) کاهش دهد و با افزایش کارایی و امکان کنترل بیشتر عملیات کوره بلند، از هزینه چدن مذاب تولیدی بکاهد. علاوه بر آن، کاهش آلودگی محیط زیست و انتشار ذرات گلخانه‌ای و مونوکسید کربن در هوا را به همراه دارد [۴]. تزریق پودر زغال داخل کوره بلند یکی از روش‌های 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، در دسترس 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>۴</sup> است. لوله دمش یا بلوپایپ لوله‌ای است که هوای دم<sup>۵</sup> مورد نیاز کوره‌بلند را از محل‌های مربوط به تولید هوا با دما و فشار بالا به کوره‌بلند می‌رساند. 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 می‌کند. ریس‌وی ناحیه‌ای است چرخشی و بالنی‌شکل که در داخل کوره‌بلند و درست جلوی دهانه لوله دمش رخ می‌دهد که بالاترین دما و عملیات کاهش کک در این ناحیه اتفاق می‌افتد. 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 یک لوله یا نازل با قطر بسیار کم است که به آن لانس تزریق می‌گویند. لانس‌ها انواع مختلفی دارند که می‌توان به لانس تکی و لانس دوگانه اشاره کرد. شکل ۲ انواع لانس را نشان می‌دهد.

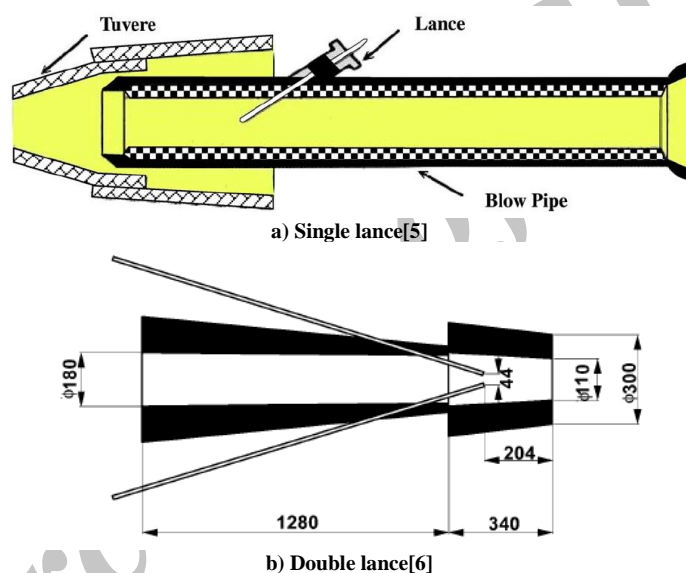


Figure 2- Representation of injection Lances

شکل ۲- نمایش انواع لانس تزریق: الف) لانس تکی [۵]، ب) نمایی 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 ۰/۴ را شبیه‌سازی کردند. نتایج کار آن‌ها به صورت توزیع دما، فشار و کسرهای جرمی هریک از ذرات حاصل از واکنش است. نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که بیشترین دما (۲۴۲۳ درجه کلوین) و بیشترین فشار در ناحیه پایین ریس‌وی رخ می‌دهد. رایگان و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۰ در کاری تجربی به بررسی چهار نوع زغال موجود در منابع ایران به منظور انتخاب بهترین گزینه برای تزریق پودر زغال در کوره‌بلند پرداختند. این زغال‌ها شامل زغال کارمزد، سنگرود، سرخس

1. Blowpipe
2. Tuyere
3. Raceway
4. Injection lance
5. 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 کوره‌های بلند کارخانه ذوب‌آهن 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 می‌یابد. این کاهش مصرف و افزایش تولید باعث افزایش سوددهی شرکت می‌شود. شن و همکاران [۹]، در سال ۲۰۱۱، مدل عددی احتراق پودر زغال و کک را در یک کوره‌بلند شبیه‌سازی کردند. حجم کنترل آن‌ها شامل لانس، لوله دمش، دهانه لوله دمش، ریس‌وی و بستر کک بود. آن‌ها ریس‌وی را شبیه‌بالتن و بستر کک را شبیه جعبه مکعبی شکل در شبیه‌سازی در نظر گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که در ناحیه ریس‌وی سرعت و دمای گاز، توزیع دی‌اکسیدکربن و مواد فرار بالاتر از سایر نقاط است. نسبت احتراق نیز به سرعت افزایش یافته، که عامل اصلی آن واکنش گازی 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 می‌شود. کاسترو و همکاران [۱۱]، در سال ۲۰۱۳، احتراق هم‌زمان پودر زغال و پودر زغال چوب<sup>۱</sup> 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 غنی‌شده 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 تبخیر سریع‌تر شده و میدان دمایی بالایی را در کوره پدید می‌آورد که همین امر باعث تبخیر زغال‌ها با مواد فرار پایین‌تر می‌شود. لیاو و همکاران [۱۵]، در سال ۲۰۱۶، به شبیه‌سازی سه‌بعدی 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 پایین‌تری دارد. همچنین، این نوع زغال دارای مواد فرار بالایی است که هنگام احتراق، دما و نسبت احتراق بالاتری را نتیجه می‌دهد. نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی (رسیدن دما و نسبت احتراق بالا در مقایسه با زغال سیاه) مطابقت قابل قبولی دارد.

1. Pulverized charcoal

با مروری بر تحقیقات علمی صورت گرفته در این زمینه، به روشنی 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 ذکر شده 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 فلونت 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، به صورت سه بعدی انجام می گیرد و اثر تغییر پارامترهای دمش کوره شامل درصد اکسیژن موجود در هوای دم و دمای هوای دم روی خروجی دهانه لوله دمش بررسی می شود. در حالت دوم، گاز طبیعی از شبیه سازی حذف و ورودی پودر زغال در دهانه لوله دمش به عنوان سوخت کوره اضافه می شود و توزیع سرعت و رفتار احتراقی آن ناحیه مورد بررسی 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 کوره بلند

احتراق پودر زغال در تجهیزات کوره بلند (لوله دمش، دهانه لوله دمش، ریسوی و کوره بلند)، به دلیل حضور جریان آشفته، واکنش های 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). نرخ واکنش، نوع مدل استفاده شده و ثوابت موجود در هر واکنش در کار شن و همکاران ارائه شده است [۱۶].

جدول ۱- واکنش های شیمیایی احتراق زغال [۱۶]

Table 1- Chemical reaction of coal [16]

Reactions	Descriptions	Models
Coal → VM + Char	DE volatilization	Two competing reaction model
VM + O <sub>2</sub> → CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	Gaseous combustion	Eddy dissipation model
Char + O <sub>2</sub> → CO <sub>2</sub>	Char oxidation	Gibb model
Char + CO <sub>2</sub> → 2CO	Char gasification	Gibb model
Char + H <sub>2</sub> O → CO + H <sub>2</sub>	Char gasification	Gibb model

زمانی که پودر زغال توسط لانس ها 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 تشعشی از گازهای داغ، دمای بالای دیواره ها 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 آن ها نیز به گاز دی اکسید کربن، 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.

1. 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  $k - \epsilon$  دارای ضرایب تجربی اند که مقدار آن‌ها براساس 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 به کار رفته در این شبیه‌سازی براساس مطالعه لاندنر 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 غیرپیش‌آمیخته<sup>۱</sup> و برای حالت سوم (گاز طبیعی و پودر زغال به‌عنوان سوخت کوره) از مدل احتراق اتلاف گردابه<sup>۲</sup> استفاده شده است. در مدل احتراق غیرپیش‌آمیخته، سوخت و اکسیدکننده در جریان‌های جداگانه‌ای به سیستم وارد می‌شوند [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 نمی‌شود و به‌جای آن معادلات انتقال کسر مخلوط حل می‌شوند [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 غیرپیش‌آمیخته است. قدرت مدل احتراق غیرپیش‌آمیخته این است که احتراق به یک یا دو واکنش کسر مخلوط کاهش می‌یابد و تمام پارامترهای ترمودینامیکی اسکالر (کسر جرمی نمونه‌های جرمی، چگالی و دما) به کسر مخلوط وابسته می‌شود. در نتیجه، احتراق به یک مسئله اختلاط ساده‌سازی شده و از مشکلات پیش‌آمده از قبیل نرخ میانگین غیرخطی واکنش صرف‌نظر می‌شود. هنگامی که که پودر زغال همراه با یک سوخت دیگر، اعم از سوخت‌های گاز، مایع یا جامد، وارد محفظه احتراق می‌شود، باید برای مدل‌سازی احتراق زغال از کسر مخلوط تکی و برای سوخت دوم جریان ثانویه در نظر گرفت که همین امر سبب پیچیده‌شدن مسئله و همگرایی کند در روند حل می‌شود. 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، به دلیل اینکه کاربر قادر است برای هر سوخت نام واکنش، نوع واکنش، وارد کردن تعداد و انتخاب نمونه‌های جرمی واکنش‌دهنده، وارد کردن تعداد و انتخاب نمونه‌های جرمی فرآورده، تعیین ضرایب استوکیومتری و غیره را برای هر واکنش به‌صورت جداگانه تعیین کند، از مدل اتلاف گردابه استفاده می‌شود. در مدل احتراق اتلاف گردابه کسر جرمی نمونه‌های جرمی پیش‌بینی می‌شود [۱۸]. برای استفاده از این روش باید مدل‌های برهم‌کنش آشفته-شیمی<sup>۳</sup> را انتخاب کرد. برهم‌کنش آشفته-شیمی نرخ واکنشی است که به‌صورت عبارت چشمه در معادله انتقال نمونه‌های جرمی ظاهر می‌شود و به مدل‌های نرخ محدود آرام<sup>۴</sup>، نرخ محدود-اتلاف گردابه<sup>۵</sup>، احتراق اتلاف گردابه و مدل احتراق مفهوم اتلاف گردابه<sup>۶</sup> طبقه‌بندی می‌شود. مدل نرخ محدود آرام به محاسبه عبارت چشمه با استفاده از مفهوم آرنیوس پرداخته و از برهم‌کنش آشفته-شیمی چشم‌پوشی می‌کند. در این مدل، اثر نوسانات آشفته نادیده گرفته می‌شود و نرخ واکنش با استفاده از سینتیک آرنیوس محاسبه می‌شود. 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 می‌شود. در مدل احتراق اتلاف گردابه فقط نرخ اختلاط محاسبه شده و از محاسبات سنگین سینتیک شیمیایی آرنیوس چشم‌پوشی می‌شود. در مدل یادشده نرخ واکنش به‌وسیله اختلاط آشفته کنترل می‌شود. مدل احتراق مفهوم اتلاف گردابه توسعه‌یافته مدل احتراق اتلاف گردابه است که به‌منظور در نظر گرفتن جزئیات مکانیزم‌های شیمیایی در جریان‌های آشفته آورده شده است. در این مدل، سینتیک شیمیایی مدل آرنیوس در شعله آشفته در نظر گرفته می‌شود.

1. Non-premixed combustion
2. Eddy dissipation
3. Turbulence-chemistry interaction
4. Laminar finite-rate
5. Finite-rate/Eddy dissipation
6. Eddy dissipation concept

## هندسه مسئله

### حالت اول) گاز طبیعی به عنوان سوخت کوره بلند

هندسه دهانه لوله دمش کوره بلند، در حالت گاز طبیعی به عنوان سوخت کوره بلند، به صورت طرحواره، در شکل ۳، آورده شده است. همان طور که مشخص است، هوای دم از ورودی با قطر ۱۸۰ میلی متر وارد می شود. ورودی گاز طبیعی نیز، در دیواره دهانه لوله دمش با قطر ۴۲ میلی متر و با زاویه ۱۵ درجه نسبت به محور  $y$ ها قرار دارد. پس از انجام واکنش های شیمیایی، مخلوط نمونه های جرمی از خروجی با قطر ۱۳۰ میلی متر به داخل کوره بلند هدایت می شوند ذکر این نکته لازم است که انحراف دیواره های دهانه لوله دمش نسبت به سطح افقی ۵ درجه و طول دهانه لوله دمش ۴۱۰ میلی متر است. همچنین، به دلیل عایق بودن دیواره ها از شرط مرزی بی دررو برای دیواره ها در تمامی حالات استفاده شده است.

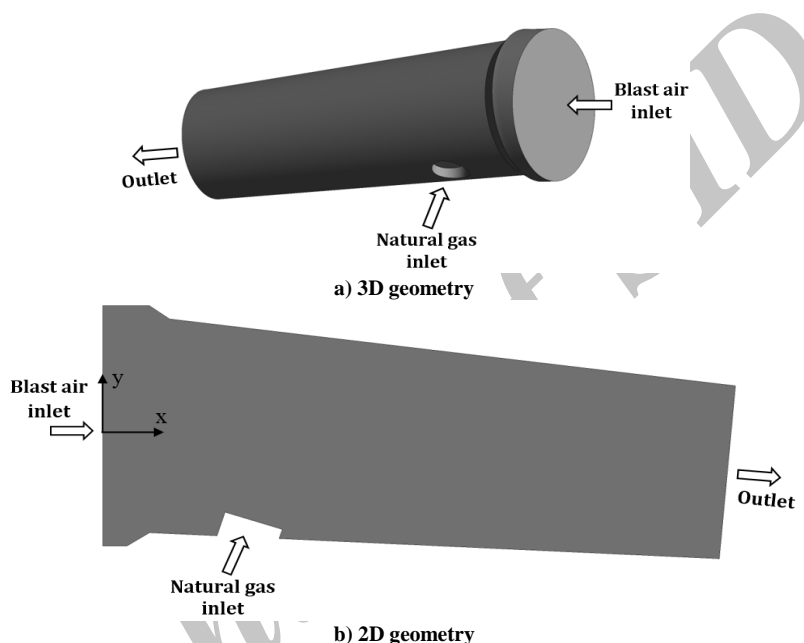


Figure 3- The tuyere geometry in natural gas case

شکل ۳- هندسه دهانه لوله دمش در حالت گاز طبیعی: الف) هندسه سه بعدی، ب) هندسه دوبعدی

### حالت دوم) پودر زغال به عنوان سوخت کوره بلند

دومین حالت برای شبیه سازی در نظر گرفتن پودر زغال به عنوان سوخت کمکی کوره بلند در دهانه لوله دمش است. در این حالت، گاز طبیعی از شبیه سازی حذف شده و هوای دم با دمای بالا و درصد اکسیژن مشخص وارد محفظه می شود و با پودر زغال واکنش انجام می دهد. هندسه دهانه لوله دمش کوره بلند در حالت دوم به صورت 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 به جای آن در مرکز ورودی هوای دم، لانس ورودی پودر زغال با قطر ۲۰ میلی متر و زاویه انحراف ۵ درجه فرض شده است. زاویه انحراف لانس پودر زغال موازی با دیواره های دهانه لوله دمش است. عمق تورفتگی ورودی پودر زغال ۱۵ میلی متر در نظر گرفته شده است.

### حالت سوم) گاز طبیعی و پودر زغال به عنوان سوخت کوره بلند

در این حالت، گاز طبیعی و پودر زغال هر دو به عنوان سوخت های کمکی کوره بلند در دهانه لوله دمش در نظر گرفته می شوند 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 می دهد.

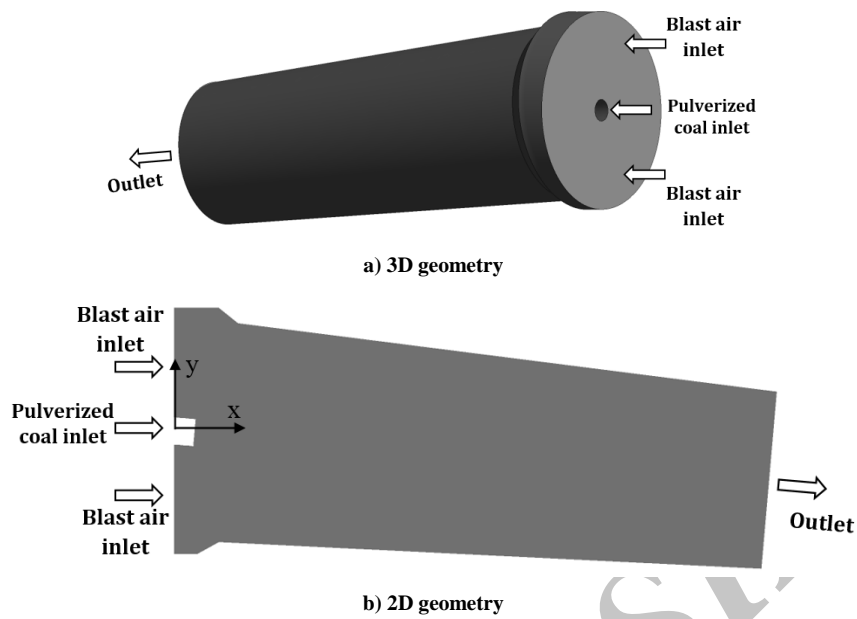


Figure 4- The tuyere geometry in pulverized coal case

شکل ۴- هندسه دهانه لوله دمش در حالت پودر زغال: الف) هندسه سه بعدی، ب) هندسه دوبعدی

هندسه دهانه لوله دمش کوره بلند به صورت 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 میلی متر است. زاویه انحراف آن در این حالت ۱۰ درجه و عمق تورفتگی این ورودی به اندازه ۲۰ میلی متر انتخاب شده است.

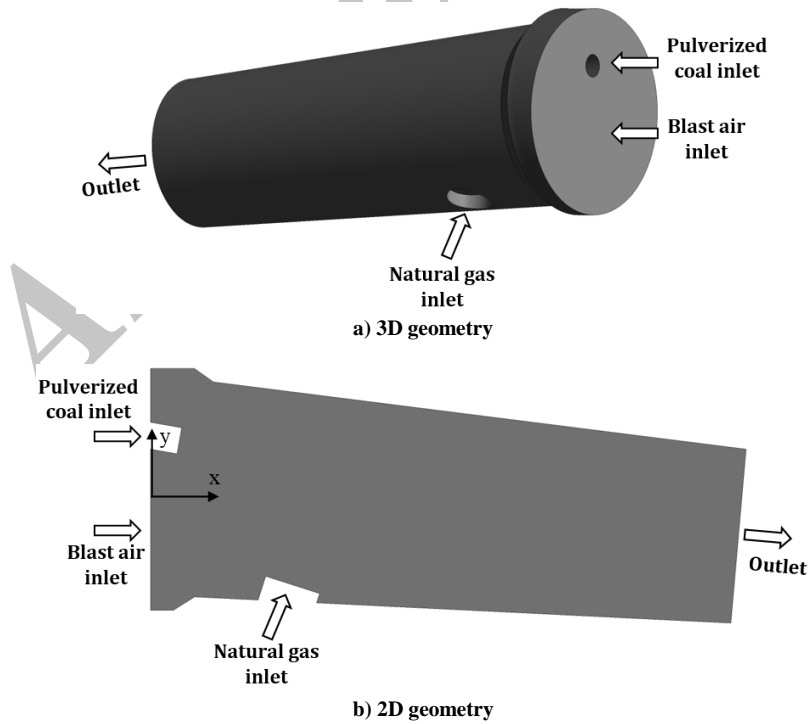


Figure 5- The tuyere geometry in natural gas and pulverized coal

شکل ۵- هندسه دهانه لوله دمش در حالت گاز طبیعی و پودر زغال: الف) هندسه سه بعدی، ب) هندسه دوبعدی



## معادلات حاکم

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

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

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

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

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{k} - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k) = (p_k - \rho \varepsilon) \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \varepsilon - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon) = \frac{\varepsilon}{k} (C_1 p_k - C_2 \rho \varepsilon) \quad (5)$$

$$\nabla \cdot ((\rho \mathbf{U} Y_i) - \left( \Gamma_i + \frac{\mu_t}{\sigma_{Y_i}} \right) \nabla Y_i) = \dot{\omega}_i \quad (6)$$

که  $\mathbf{U}$  سرعت میانگین گاز،  $\dot{m}$  نرخ انتقال جرم از ذرات،  $\mu$  ضریب لزجت دینامیکی،  $\mu_t$  ضریب لزجت جریان آشفته،  $p$  فشار،  $f_D$  نیروی پسا<sup>۱</sup> ناشی از ذرات،  $H$  آنتالپی،  $\lambda$  ضریب هدایت گرمایی،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه،  $\sigma_H$  عدد پراوتل مدل آشفته،  $\dot{q}$  نرخ انتقال حرارت از ذرات،  $\sigma_k$  عدد پراوتل انرژی جنبشی آشفته،  $p_k$  تولید آشفته ناشی از نیروهای لزج،  $\sigma_\varepsilon$  عدد پراوتل نرخ اتلاف آشفته،  $C_1$  و  $C_2$  ثوابت جریان آشفته،  $Y_i$  کسر جرمی نمونه جرمی  $\dot{\omega}_i$  نرخ واکنش نمونه جرمی بر واحد حجم برای نمونه جرمی  $\dot{m}$  است. همان‌طور که ذکر شد، برای مدل‌سازی احتراق پودر زغال از دو مدل احتراق اتلاف گردابه و مدل احتراق غیرپیش‌آمیخته استفاده شده است. در روش احتراق غیر پیش‌آمیخته معادله انتقال نمونه‌های جرمی (معادله (۶)) حل نمی‌شود و به جای آن، معادلات انتقال کسر مخلوط حل می‌شوند. این معادلات در روابط (۷) و (۸) آورده شده‌اند.

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \bar{f}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_f} \nabla \bar{f} \right) + S \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \bar{f}^2) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_f} \nabla \bar{f}^2 \right) + C_g \mu_t (\nabla \bar{f})^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \bar{f}^2 + S \quad (8)$$

که  $\bar{f}$  کسر مخلوط میانگین،  $\sigma_f$  ثابت و برابر  $0.185$ ،  $S$  عبارت چشمه،  $\bar{f}^2$  واریانس کسر مخلوط میانگین،  $C_g$  و  $C_d$  ثابت و به ترتیب برابر با  $2/86$  و  $2$  هستند. ذرات زغال به‌عنوان فاز پراکنده‌اند و قانون دوم نیوتن برای حرکت آن‌ها به کار می‌رود. انتقال حرارت نیز شامل انتقال حرارت جابه‌جایی، انتقال گرمای نهان همراه با انتقال جرم و انتقال حرارت تشعشعی روی سطح ذرات زغال است. معادلات حاکم ذرات زغال به ترتیب بقای جرم، تکانه و انرژی در روابط (۹) تا (۱۱) آورده شده‌اند.

$$\frac{dm_p}{dt} = -\dot{m} \quad (9)$$

$$m_p \frac{d\mathbf{U}_p}{dt} = -f_D \quad (10)$$

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = -\dot{q} \quad (11)$$

که  $m_p$  جرم و  $\mathbf{U}_p$  سرعت میانگین ذرات زغال است. تعریف ضریب لزجت جریان آشفته، نیروی پسا ناشی از ذرات، نرخ انتقال حرارت از ذرات، تولید آشفته ناشی از نیروهای لزج، ضریب درگ و کسر مخلوط در معادلات (۱) تا (۱۱)، به ترتیب، در معادلات (۱۲) تا (۱۷) نشان داده شده است.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (12)$$

1. Drag

$$-f_D = \frac{1}{8} \pi d_p^2 \rho C_D |U - U_p| (U - U_p) \quad (13)$$

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

$$p_k = (\mu + \mu_t) \nabla U \cdot (\nabla U + (\nabla U)^T) \quad (15)$$

$$C_D = \max\left(\frac{24(1 + 0.15Re^{0.687})}{Re}, 0.44\right) \quad (16)$$

$$f = \left(\frac{Y_i - Y_{i,ox}}{Y_{i,fuel} - Y_{i,ox}}\right) \quad (17)$$

که  $C_\mu$  ثابت جریان آشفته،  $d_p$  قطر ذرات زغال،  $C_D$  ضریب درگ به دست آمده از رابطه اصلاح شده شیلر و نیومن [۱۶]،  $Nu$  عدد ناسلت،  $H_{reac}$  گرمای واکنش،  $A_p$  سطح ذره،  $\varepsilon_p$  ضریب صدور،  $I$  شدت تشعشع،  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن،  $Re$  عدد رینولدز و زیروندهای  $ox$  و  $fuel$  به ترتیب نشان دهنده المان اکسیدکننده و سوخت است.

مدل تشعشع مورد استفاده DO است که معادله انتقال حرارت تشعشعی آن در رابطه (۱۸) مشاهده می شود [۱۸].

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (\alpha + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega \quad (18)$$

که  $\vec{r}$  بردار مکان،  $\vec{s}$  بردار مسیر،  $\alpha$  ضریب جذب،  $n$  شاخص انکساری،  $\sigma_s$  ضریب پخش،  $\phi$  تابع فاز،  $\vec{s}$  بردار مسیر پخشی،  $\Omega$  تابع جامد و  $(\alpha + \sigma_s)$  ضخامت نوری است.

مقادیر ثوابت جریان آشفته به کاررفته در این شبیه سازی، براساس مطالعه لاندرو و اسپالدینگ [۱۷] بوده و به شرح زیر است.

$$\begin{array}{lll} C_\mu = 0.09, & \sigma_k = 1, & \sigma_\varepsilon = 1.3 \\ C_1 = 1.44, & C_2 = 1.92, & \sigma_H = 0.85 \end{array}$$

## نتایج شبیه سازی

### اعتبارسنجی

برای حصول اطمینان از درستی روش حل در ادامه سه اعتبارسنجی به منظور تأیید روش حل انجام شده است.

### اعتبارسنجی با نتایج تجربی

در این اعتبارسنجی، مقدار کسر جرمی دی اکسیدکربن با نمونه آزمایشگاهی تجهیزات احتراق نیوکاسل و شبیه سازی انجام شده توسط لی و همکاران [۱۲] مقایسه شده است. برای شبیه سازی از مدل ساده شده 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 می شود، 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 شبیه سازی استفاده شده است. جدول ۲ آنالیزهای تقریبی و نهایی زغال مورد استفاده در شبیه سازی را نشان می دهد.

پس از آنکه فرایند احتراق پودر زغال به اتمام رسید، مقدار کسر جرمی دی اکسیدکربن 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 به ترتیب برابر ۰/۳۳، ۰/۶۲۶ و ۱/۰۳ متر است. برای یافتن اختلاف نسبی بین داده ها از رابطه (۱۹) استفاده می شود.

$$e = \frac{|x - x_{ref}|}{x_{ref}} \times 100 \quad (19)$$

که  $X$  بیانگر مقدار پارامتر به دست آمده از شبیه سازی حاضر و  $X_{ref}$  بیانگر مقدار پارامتر به دست آمده در کار لی و همکاران و نمونه آزمایشگاهی است. در جدول ۳ مقایسه نتایج شبیه سازی با کار لی و همکاران و نمونه آزمایشگاهی آورده شده است. همان طور که در جدول ۳ مشخص است، اختلاف نسبی به دست آمده از مقایسه کار حاضر با کار لی و همکاران زیر ۷ درصد و در مقایسه با نمونه های آزمایشگاهی زیر ۱۳ درصد است که این امر نشان می دهد کار حاضر از مطابقت قابل قبولی برخوردار است.

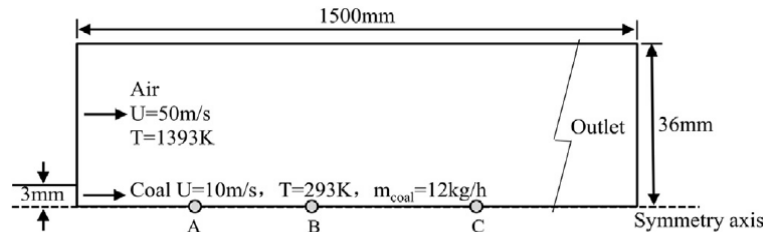


Figure 6- The diagram of physical model of pulverized coal combustion[12]

جدول ۲- آنالیزهای تقریبی و نهایی پودر زغال بر حسب درصد

Table 2- Proximate and ultimate analysis of pulverized coal (%)

Oxygen	Hydrogen	Fixed carbon	Ash	Volatile matter
3.5	4.83	91.7	10	19.2

شکل ۶- مدل فیزیکی تجهیزات احتراق پودر زغال در آزمایشگاه نیوکاسل [۱۲]

جدول ۳- مقایسه کسر جرمی دی اکسید کربن با کار لی و همکاران و نمونه آزمایشگاهی نیوکاسل [۱۲]

Table 3- Comparison of present work with li et al. simulation and tested results of CO<sub>2</sub> mass fraction[12]

Points	Present work	Li et al. results	Experimental results	Comparison with li et al. results (%)	Comparison with experimental results (%)
A	12.51	13.4	13.8	6.64	9.34
B	14.76	14.5	15.6	1.79	5.38
C	15.91	15.1	14.1	5.36	12.83

### اعتبارسنجی با نتایج گو و همکاران

اعتبارسنجی دیگر مربوط به شبیه سازی سه بعدی احتراق پودر زغال درون دهانه لوله دمش کوره بلند است که توسط گو و همکاران [۱۹] انجام گرفت. آن ها برای رژیم جریان از مدل جریان آشفته استاندارد  $k - \epsilon$  و برای انتقال حرارت تشعشعی از مدل DO استفاده کردند. هندسه شبیه سازی آن ها 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 میلی متر است، وارد می شود. برای دیواره های محفظه، فرض عدم لغزش و بی دررو در نظر گرفته شده است. هوای دم با اکسیژن غنی سازی شده است، به گونه ای که به ازای هر ۱۰۰ متر مکعب هوا، ۸ متر مکعب اکسیژن وجود دارد. آنالیزهای تقریبی و نهایی زغال به کار رفته در شبیه سازی در جدول ۴ آورده شده است.

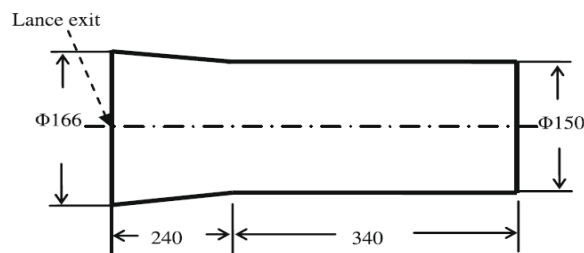


Figure 7- The geometry of tuyere in Gu et al. simulation[19]

شکل ۷- هندسه دهانه لوله دمش کوره بلند در کار گو و همکاران [۱۹]

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

Ultimate analysis					Proximate analysis			
S	N	O	H	C	Moisture	Ash	Fixed carbon	Volatile matter
0.84	1.67	4.72	4.82	78.76	3.6	5.59	56.49	34.32

شکل ۸ خطوط هم‌دما حاصل از شبیه‌سازی را با نتایج گو و همکاران مقایسه می‌کند. با مشاهده شکل می‌توان دریافت که وقتی ذرات زغال بدون زاویه وارد محفظه می‌شود، توزیع متقارن دمای گازی را نتیجه می‌دهد. همچنین، با مقایسه کار حاضر با کار گو و همکاران [۱۹]، نتیجه گرفته می‌شود که کار حاضر از اعتبار قابل قبولی برخوردار است.

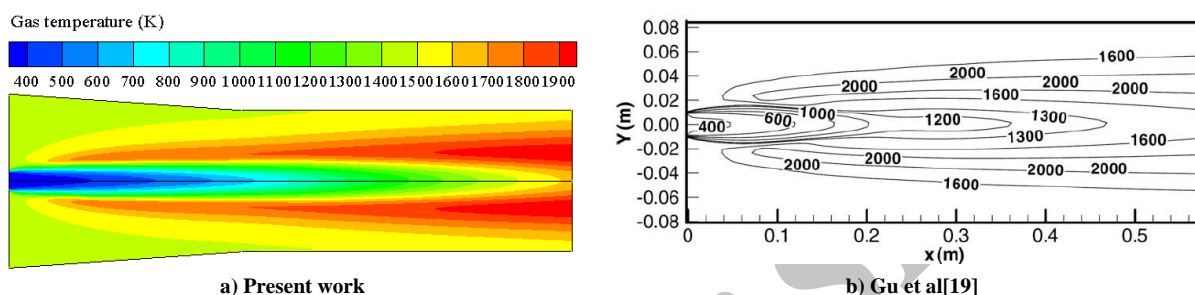


Figure 8- Comparison isothermal lines of present work with Gu et al [19]

شکل ۸- مقایسه خطوط هم‌دما به دست آمده از کار حاضر با کار گو و همکاران [۱۹]: الف) کار حاضر، ب) کار گو و همکاران [۱۹]

### اعتبارسنجی با نتایج تجربی کوره بلند ذوب آهن اصفهان

در اعتبارسنجی آخر، به مقایسه حداکثر دمای خروجی دهانه لوله دمش با دمای شبیه‌سازی شده و حداکثر فشار در ورودی هوای دم با فشار حاصل از شبیه‌سازی پرداخته می‌شود. بدین منظور، شبیه‌سازی احتراق گاز طبیعی بدون حضور پودر زغال در دهانه لوله دمش در کوره بلند ذوب آهن اصفهان صورت گرفت. هندسه دهانه لوله دمش کوره بلند به صورت طرحواره در شکل ۳ آورده شده است. همان‌گونه که در شکل نمایان است، هوا با دبی جرمی، درصد اکسیژن و دمای معین وارد شده و با گاز طبیعی طبق واکنش یک مرحله‌ای (۲۰) واکنش می‌دهد و به کوره بلند وارد می‌شود.



پس از انجام شبیه‌سازی، بیشترین دمای به دست 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. علاوه بر حداکثر دمای خروجی، فشار در ورودی دهانه لوله دمش نیز اندازه‌گیری شد. پس از انجام شبیه‌سازی، بیشترین فشار در ورودی هوای دم برابر ۱۹۸۶۴۵ پاسکال (۱/۹۶ اتمسفر) به دست آمد که خطای آن طبق رابطه (۱۹) در مقایسه با فشار ورودی خوانده شده در اطاق کنترل کوره بلند (۲۱۲۷۸۲/۵ پاسکال برابر با ۲/۱ اتمسفر) برابر با ۶/۶۴ درصد است. ملاحظه می‌شود که خطا هم در دمای خروجی و هم در فشار ورودی نسبت به اطلاعات تجربی زیر ۱۰ درصد است و این نکته نشان می‌دهد که کار حاضر از مطابقت قابل قبولی برخوردار است.

### معیار همگرایی و روش حل عددی

معیار همگرایی برای تمامی معادلات  $10^{-5}$  است و تعداد ۲۰۰۰ تکرار در نرم‌افزار در نظر 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 آشفتنگی، نرخ اتلاف آشفتنگی و انتقال حرارت تشعشی از طرح بالادست مرتبه اول استفاده شده است.

### گاز طبیعی به عنوان سوخت کوره بلند

اولین حالت برای شبیه سازی، در نظر گرفتن گاز طبیعی به عنوان سوخت کمکی کوره بلند 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 می دهد. در ادامه شرایط مرزی، استقلال از شبکه و تأثیر پارامترهای دمش در این حالت بررسی شده است.

#### شرایط مرزی

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

جدول ۵- شرایط ایدئال عملکرد کوره بلند ذوب آهن اصفهان در حالت گاز طبیعی

Table 5- Ideal Operational condition of Esfahan steel blast furnace in natural gas case

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 ( $\frac{m^3}{h}$ )	Temperature (C)	-
	19000	20	-
Outlet	Pressure outlet (atm)	-	-
	2.8	-	-
Walls	Adiabatic	-	-

#### استقلال از شبکه

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

جدول ۶- تحلیل استقلال از شبکه در حالت گاز طبیعی

Table 6- Grid study in natural gas case

Mode	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
4	4	181235	1028795	1352.96	0.001
5	3.5	268344	1532644	1352.97	-

#### خطوط هم دما، فشار ثابت و کانتور سرعت در حالت گاز طبیعی

به منظور نمایش توزیع دما، فشار و سرعت، خطوط هم دما، فشار ثابت و کانتور سرعت در شرایط ایدئال عملکرد کوره بلند (جدول ۵) در شکل ۹ آورده شده است. همان طور که در شکل مشخص است، گاز به محض ورود به محفظه با هوای دم واکنش داده و در خروجی به بیشترین دما و سرعت می رسد.

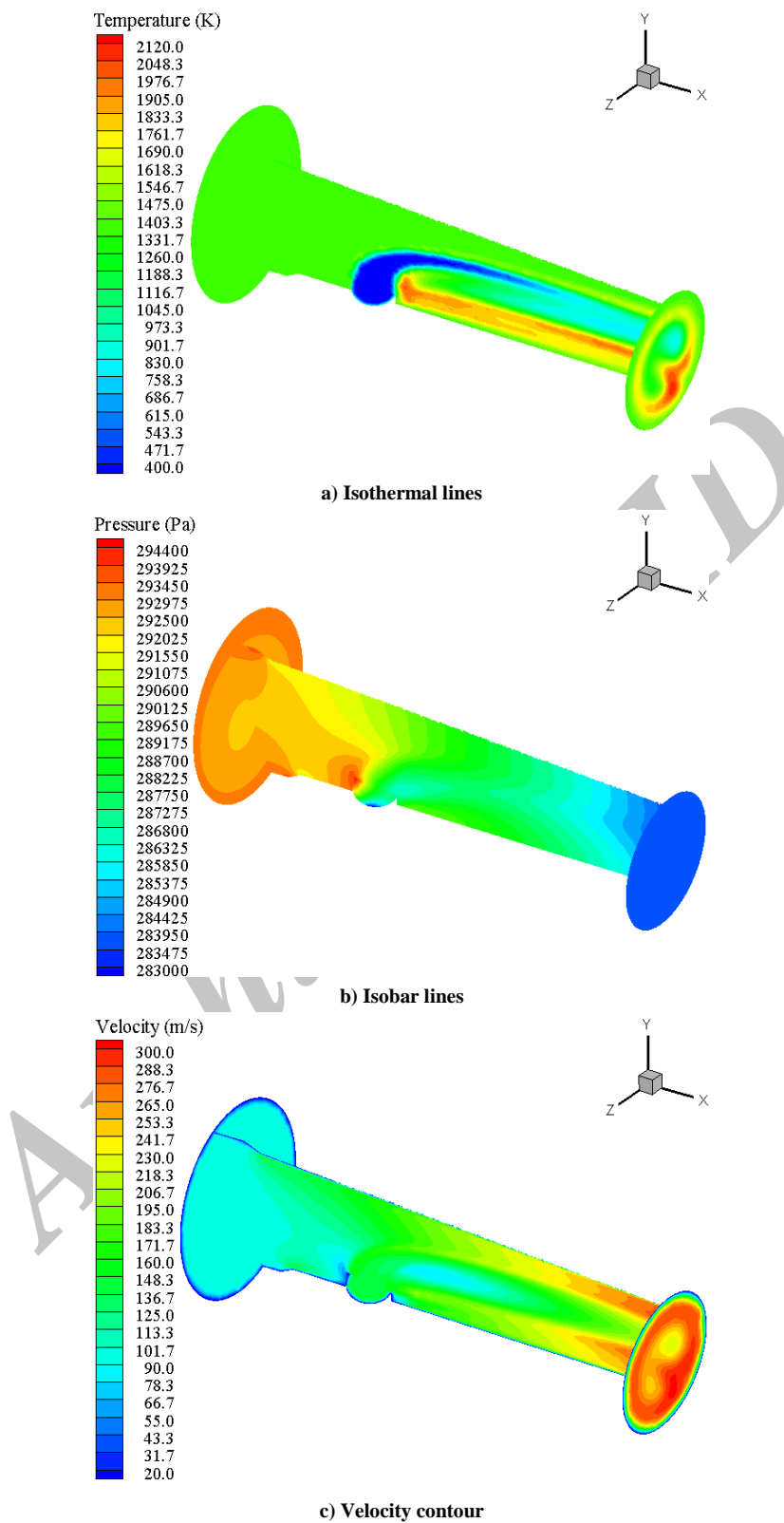


Figure 9- Isothermal lines, isobar lines and velocity contour in natural gas case

شکل ۹- خطوط همدم، فشار ثابت و کانتور سرعت در حالت گاز طبیعی: الف) خطوط همدم، ب) خطوط فشار ثابت، ج) کانتور سرعت

### تأثیر درصد اکسیژن در هوای دم

به منظور بررسی اثر درصد اکسیژن در هوای دم، شبیه‌سازی در درصدهای اکسیژن ۲۱، ۲۳، ۲۵، ۲۶، ۲۷/۵ و ۳۵ در نقاط در نظر گرفته شده برای دما و سرعت میانگین در مقطع خروجی، که با رنگ قرمز در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند، انجام گرفته است و نتایج آن به صورت 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>۴</sup> در شکل ۱۲ آورده شده است.

ذکر این نکته لازم است که درصدهای اکسیژن یادشده، درصدهای مورد استفاده در هوای دم در کوره بلند ذوب آهن است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد اکسیژن موجود در هوای دم باعث افزایش دمای خروجی می‌شود [۲۰]؛ 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 جنب‌وجوش بیشتر نمونه‌های جرمی می‌شود که افزایش سرعت در خروجی را به همراه دارد.

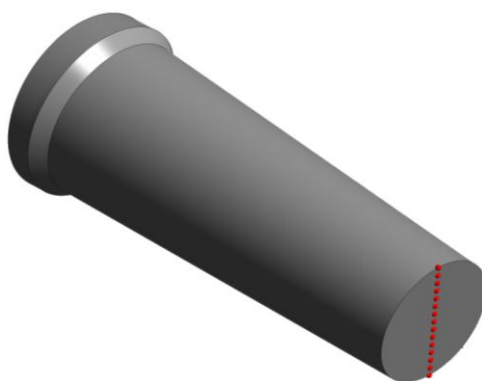


Figure 10- The representation of points in outlet

شکل ۱۰- نمایش نقاط در خروجی

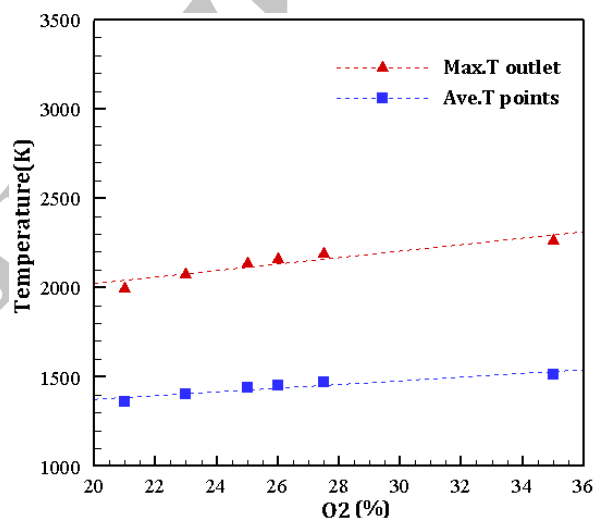


Figure 11- Outlet temperature changes in terms of increasing oxygen content in natural gas case

شکل ۱۱- تغییرات دمای خروجی بر حسب افزایش درصد اکسیژن در حالت گاز طبیعی

1. Max.T outlet
2. Ave.T points
3. Max.V outlet
4. Ave.V points

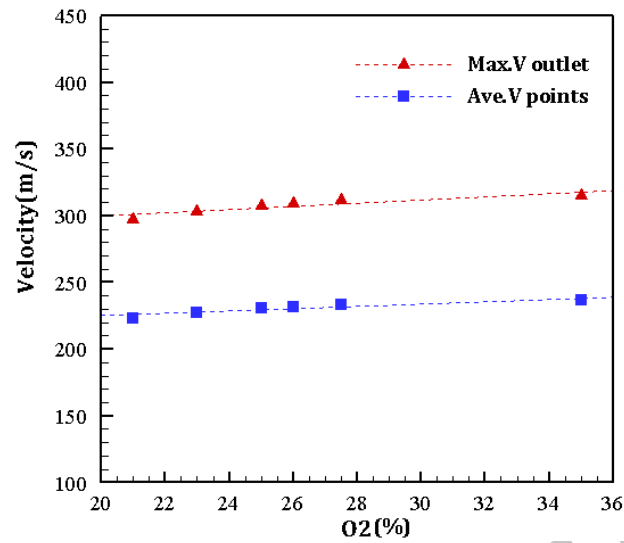


Figure 12- Outlet velocity changes in terms of increasing oxygen content in natural gas case  
 شکل ۱۲- تغییرات سرعت خروجی برحسب افزایش درصد اکسیژن در حالت گاز طبیعی

#### تأثیر دمای هوای دم

پارامتر دیگر مورد بررسی افزایش دمای هوای دم ورودی به کوره بلند است. بدین منظور، شبیه‌سازی در شرایط مرزی ایدئال کوره بلند با پنج دمای ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۰۸۰، ۱۲۰۰ و ۱۳۰۰ درجه سلسیوس انجام گرفته است و نتایج آن به صورت تغییرات دما و سرعت خروجی برحسب دمای هوای دم به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دمای هوای دم باعث افزایش انرژی گازه‌های داغ شده که این افزایش انرژی، افزایش دما و سرعت در خروجی را نتیجه می‌دهد [۲۰].

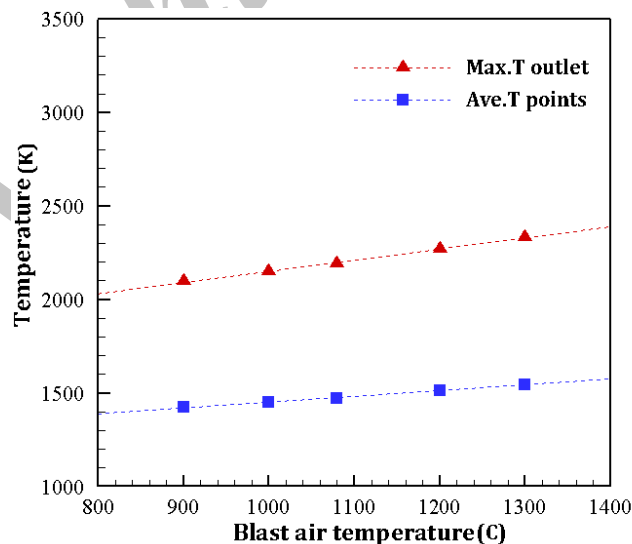


Figure 13- Outlet temperature changes in terms of increasing blast air temperature in natural gas case  
 شکل ۱۳ تغییرات دمای خروجی برحسب افزایش دمای هوای دم در حالت گاز طبیعی



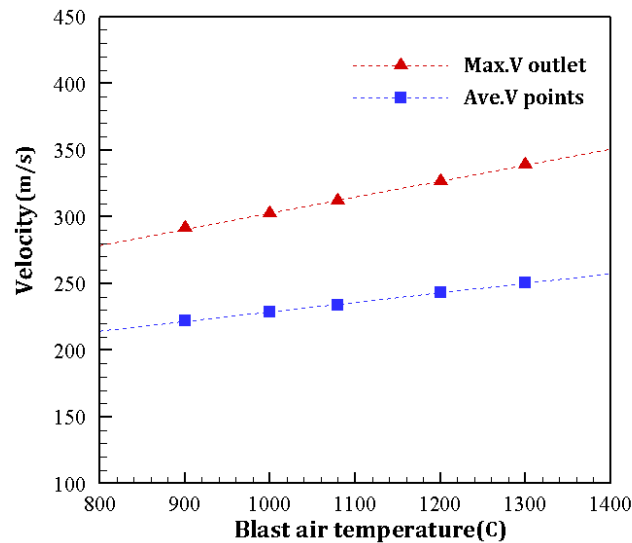


Figure 14- Outlet velocity changes in terms of increasing blast air temperature in natural gas case

شکل ۱۴- تغییرات سرعت خروجی برحسب افزایش دمای هوای دم در حالت گاز طبیعی

### پودر زغال به عنوان سوخت کوره بلند

دومین حالت برای شبیه سازی در نظر گرفتن پودر زغال به عنوان سوخت کمکی کوره بلند در دهانه لوله دمش است. در این حالت، گاز طبیعی از شبیه سازی حذف شده و هوای دم با دمای بالا و درصد اکسیژن مشخص وارد محفظه شده و با پودر زغال واکنش انجام می دهد. در ادامه شرایط مرزی، استقلال از شبکه و تأثیر پارامترهای دمش در این حالت بررسی شده است.

### شرایط مرزی

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 آشفته گی 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.

جدول ۷- شرایط ایدئال عملکرد کوره بلند ذوب آهن اصفهان در حالت پودر زغال

Table 7- Ideal Operational condition of Esfahan steel blast furnace in pulverized coal case

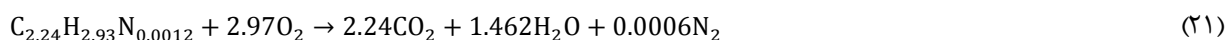
Boundary conditions	Operational condition		
	Mass flow rate ( $\frac{m^3}{min}$ )	Temperature (C)	Oxygen content (%)
Blast air	3500	1080	27.5
	Mass flow rate ( $\frac{kg}{h}$ )	Temperature (C)	-
Pulverized coal	50	27	-
	Pressure outlet (atm)	-	-
Outlet	2.8	-	-
	Walls	Adiabatic	-

زغال مورد استفاده در کار حاضر زغال کارمزد است که به دلیل 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 به دست می آید که در واکنش (۲۱) قابل مشاهده است.

جدول ۸- آنالیزهای تقریبی و نهایی پودر زغال کارمزد برحسب درصد [۸]

Table 8- Proximate and ultimate analysis of Karmozd coal (%) [8]

Ultimate analysis			Proximate analysis			
S	H	C	Moisture	Ash	Fixed carbon	Volatile matter
1	4.3	70.1	11	10	45	34



### استقلال از شبکه

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.

جدول ۹- تحلیل استقلال از شبکه در حالت پودر زغال

Table 9- Grid study in pulverized coal case

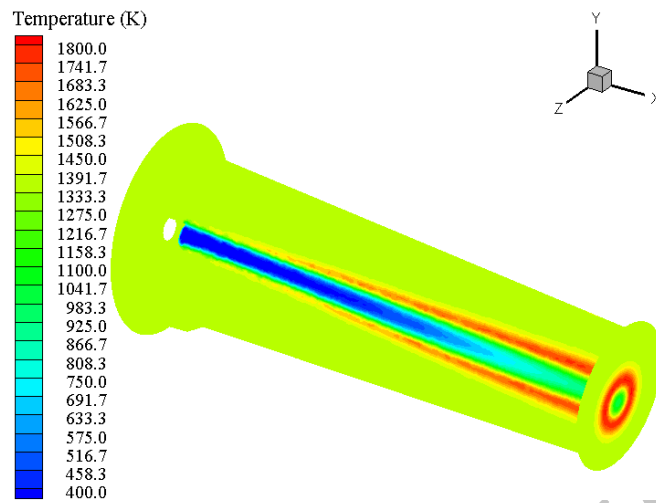
Mode	Element size (mm)	Number of nodes	Number of elements	Temperature (K)	Error (%)
1	8	23990	129617	550.379	15.711
2	6	55443	306903	463.907	9.41
3	4.5	128589	725624	420.24	6.74
4	4	181809	1032539	391.905	5
5	3.5	269204	1538081	369.687	-

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

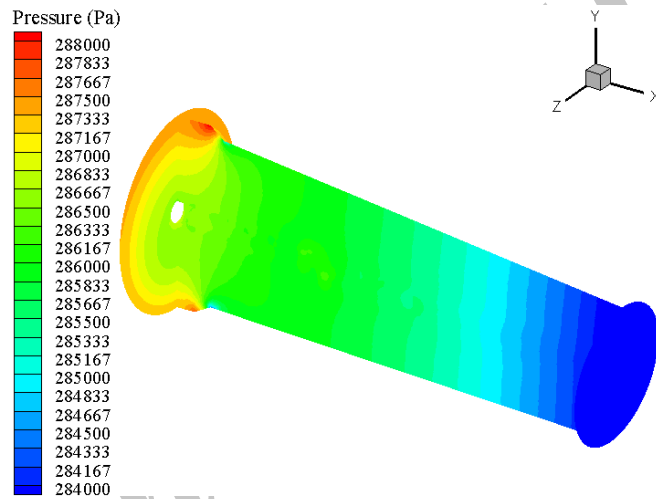
به‌منظور نمایش توزیع دما، فشار و سرعت، خطوط هم‌دما، فشار ثابت و کانتور سرعت در شرایط ایدئال عملکرد کوره‌بلند (جدول ۷) در شکل ۱۵ آورده شده است. با توجه به شکل، توزیع دما، به‌دلیل قرار گرفتن ورودی پودر زغال در مرکز ورودی، متقارن است. بیشترین و کمترین مقدار فشار نیز در ورودی و خروجی لوله دمش است. سرعت در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

### تأثیر درصد اکسیژن در هوای دم

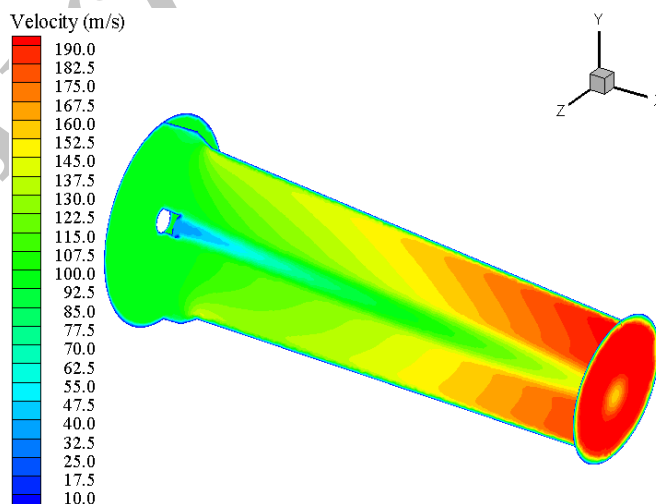
افزایش درصد اکسیژن در هوای دم در حالت پودر زغال نیز، همانند حالت گاز طبیعی بررسی شده است و نتایج آن به‌صورت تغییرات دما و سرعت در خروجی به‌ترتیب در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد اکسیژن موجود در هوای دم باعث افزایش دمای خروجی می‌شود. به دلیل اینکه وقتی اکسیژن خالص در مقدار هوای دم ثابت، افزایش می‌یابد نیتروژن کمتر وجود داشته و باعث افزایش دمای شعله می‌شود، ولی به‌دلیل کم‌تر بودن ارزش حرارتی پودر زغال نسبت به گاز طبیعی به دمای کمتری نسبت به گاز طبیعی می‌رسد. همان‌طور که در شکل ۱۷ نمایان است، افزایش درصد اکسیژن در این حالت روی سرعت اثر بسیار کمی دارد، به‌گونه‌ای که سرعت در خروجی افزایش یافته است، ولی این افزایش بسیار ناچیز است.



a) Isothermal lines



b) Isobar lines



c) Velocity contour

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

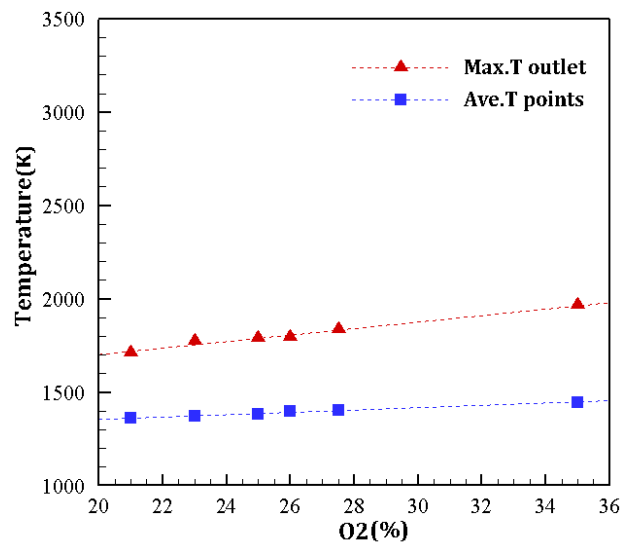


Figure 16- Outlet temperature changes in terms of increasing oxygen content in pulverized coal case

شکل ۱۶- تغییرات دمای خروجی برحسب افزایش درصد اکسیژن در حالت پودر زغال

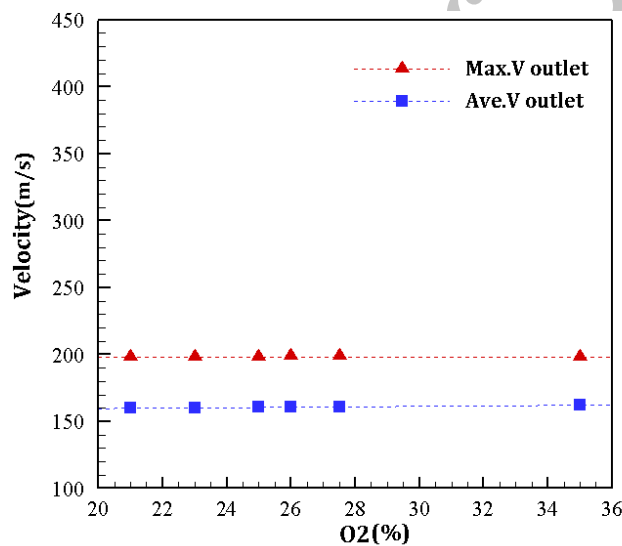


Figure 17- Outlet velocity changes in terms of increasing oxygen content in pulverized coal case

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، ۱۲۰۰ و ۱۳۰۰ درجه سلسیوس انجام گرفته است و نتایج آن به صورت 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. پایین‌تر بودن حداکثر دمای خروجی پودر زغال نسبت به حداکثر دمای خروجی گاز طبیعی به دلیل تفاوت در ارزش حرارتی پودر زغال نسبت به گاز طبیعی است.

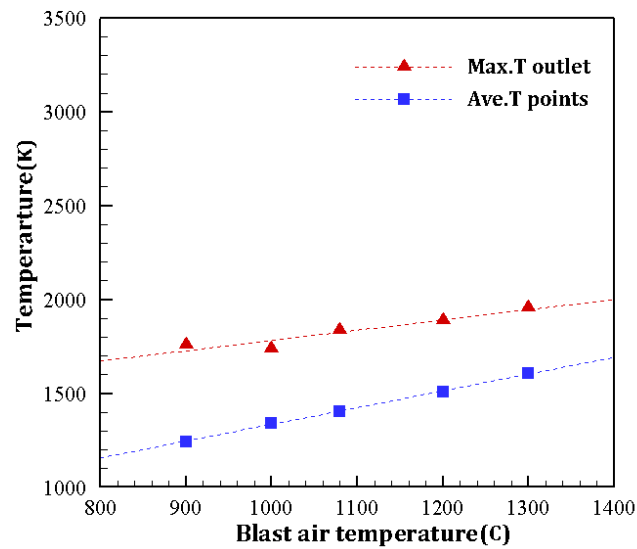


Figure 18- Outlet temperature changes in terms of increasing blast air temperature in pulverized coal case  
 شکل ۱۸- تغییرات دمای خروجی برحسب افزایش دمای هوای دم در حالت پودر زغال

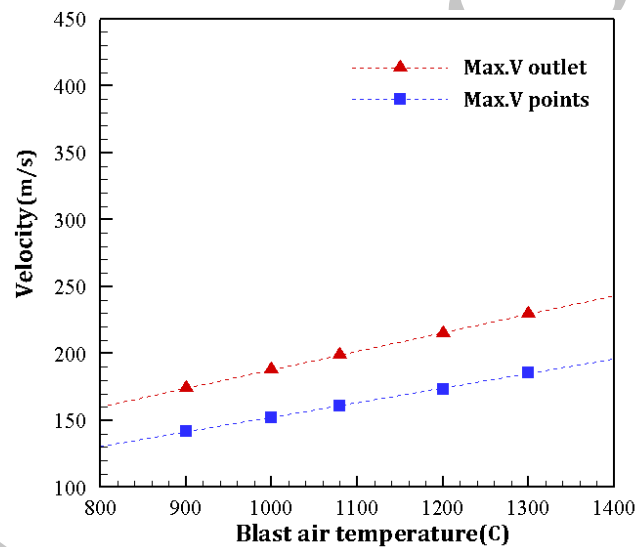


Figure 19- Outlet velocity changes in terms of increasing blast air temperature in pulverized coal case  
 شکل ۱۹- تغییرات سرعت خروجی برحسب افزایش دمای هوای دم در حالت پودر زغال

### گاز طبیعی و پودر زغال به عنوان سوخت کوره بلند

سومین حالت شبیه سازی در نظر 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 کوره بلند و ۲۶ عدد دهانه لوله دمش است. شدت آشفته گی 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. زغال مورد استفاده در این حالت نیز، زغال کارمزد است.

جدول ۱۰- شرایط ایدئال عملکرد کوره بلند 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

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 ( $\frac{m^3}{h}$ )	Temperature (C)	-
	19000	20	-
Pulverized coal	Mass flow rate ( $\frac{kg}{h}$ )	Temperature (C)	-
	20	27	-
Outlet	Pressure outlet (atm)	-	-
	2.8	-	-
Walls	Adiabatic	-	-

#### 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 کلونین اندازه‌گیری شده است. برای شبیه‌سازی، از حالت ۴ با اختلاف نسبی ۰/۰۳ درصد استفاده می‌شود.

جدول ۱۱- تحلیل استقلال از شبکه در حالت گاز طبیعی و پودر زغال

Table 11- Grid study in natural gas and pulverized coal case

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	-

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

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

شایان ذکر است که دلیل نمایش کانتورها به صورت مقطع، عدم قرارگیری ورودی‌های گاز طبیعی و پودر زغال در یک صفحه است. نکته قابل توجه این است که با شرایط ایدئال کوره بلند 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.

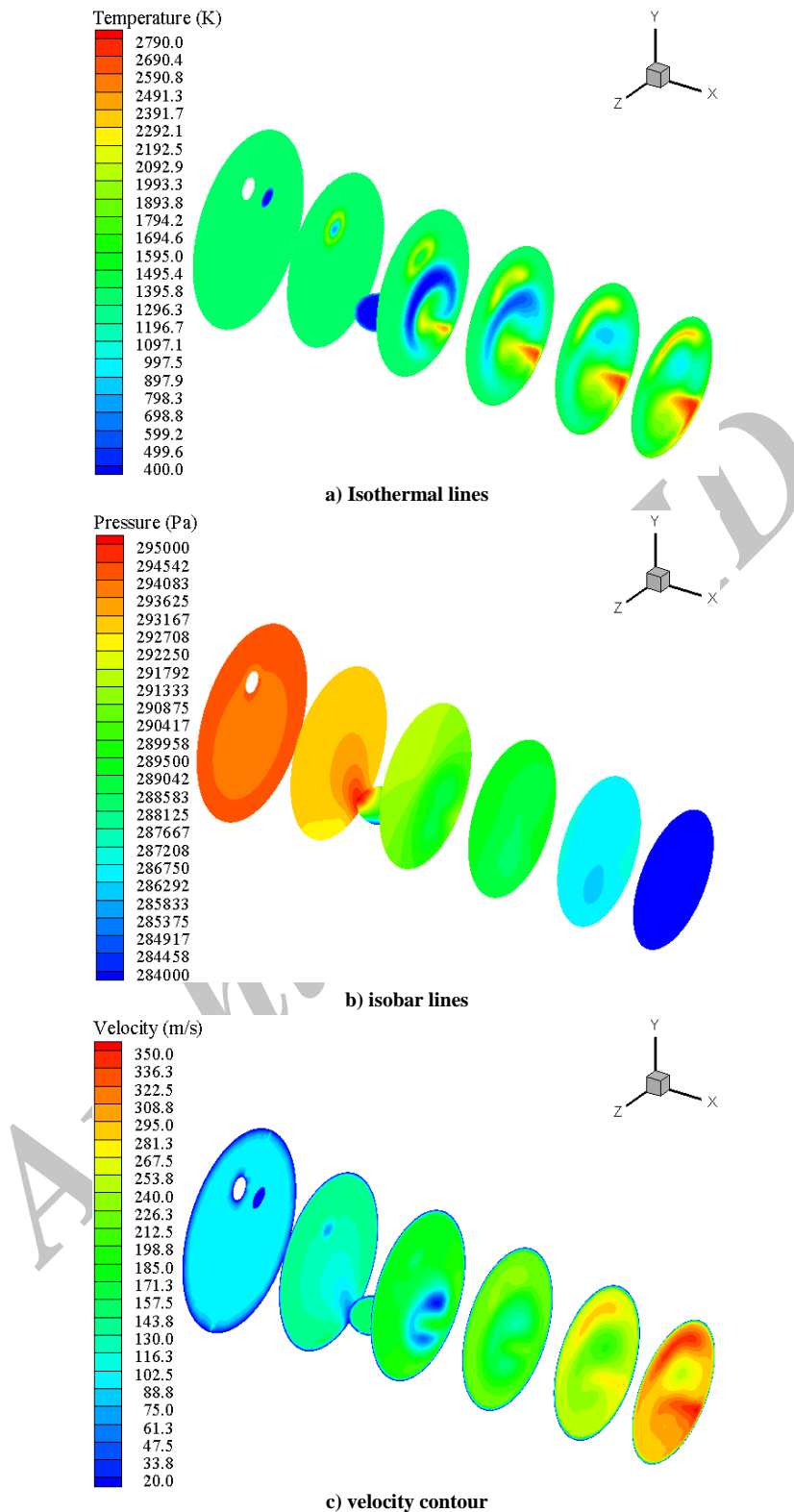


Figure 20- Isothermal lines, isobar lines and velocity contour in natural gas and pulverized coal case

شکل ۲۰- خطوط هم‌دما، فشار ثابت و کانتور سرعت در حالت گاز طبیعی و پودر زغال: الف) خطوط هم‌دما، ب) خطوط فشار ثابت، ج) کانتور سرعت

### تأثیر درصد اکسیژن در هوای دم

به منظور 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 به صورت نمودارهای تغییرات دمایی خروجی در شکل ۲۱ و تغییرات سرعت خروجی در شکل ۲۲ آورده شده است. شرایط مرزی مورد استفاده در این حالت، شرایط ذکر شده 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.

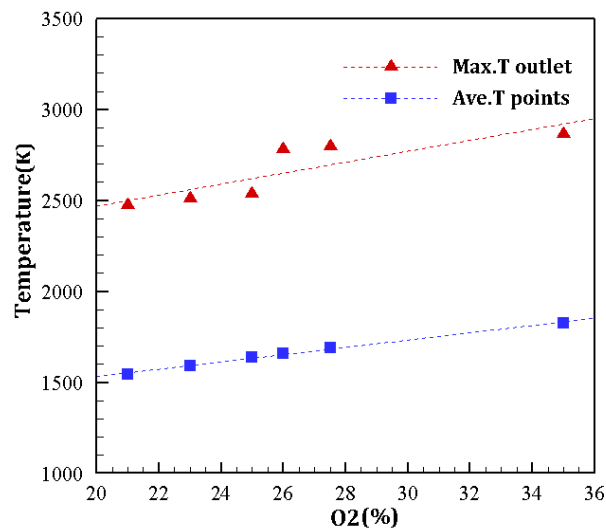


Figure 21- Outlet temperature changes in terms of increasing oxygen content in natural gas and pulverized coal case  
 شکل ۲۱- تغییرات دمایی خروجی برحسب افزایش درصد اکسیژن در حالت گاز طبیعی و پودر زغال

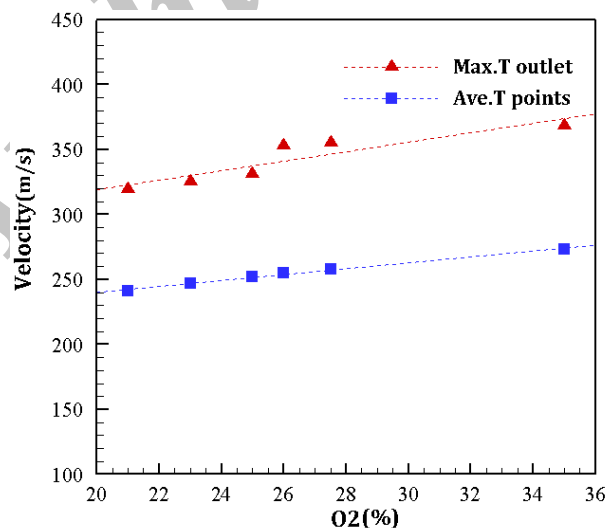


Figure 22- Outlet velocity changes in terms of increasing oxygen content in natural gas pulverized coal case  
 شکل ۲۲- تغییرات سرعت خروجی برحسب افزایش درصد اکسیژن در حالت گاز طبیعی و پودر زغال



### تأثیر دمای هوای دم

تأثیر افزایش دمای هوای دم در پنج دمای ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۰۸۰، ۱۲۰۰ و ۱۳۰۰ درجه سلسیوس شبیه‌سازی شده است و نتایج آن به صورت 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.

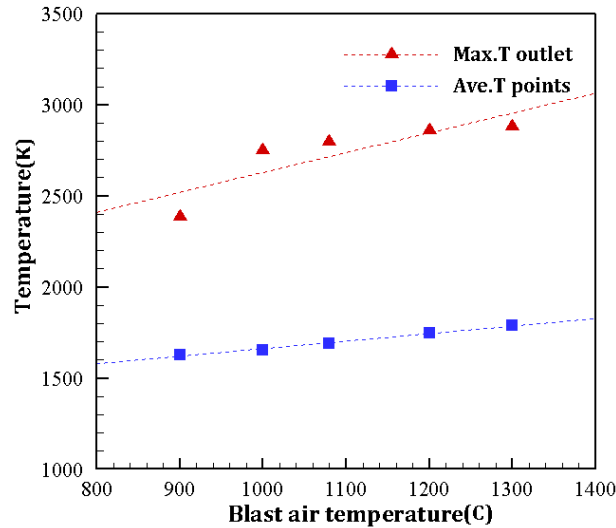


Figure 23- Outlet temperature changes in terms of increasing blast air temperature in natural gas and pulverized coal case

شکل ۲۳- تغییرات دمای خروجی برحسب افزایش دمای هوای دم در حالت گاز طبیعی و پودر زغال

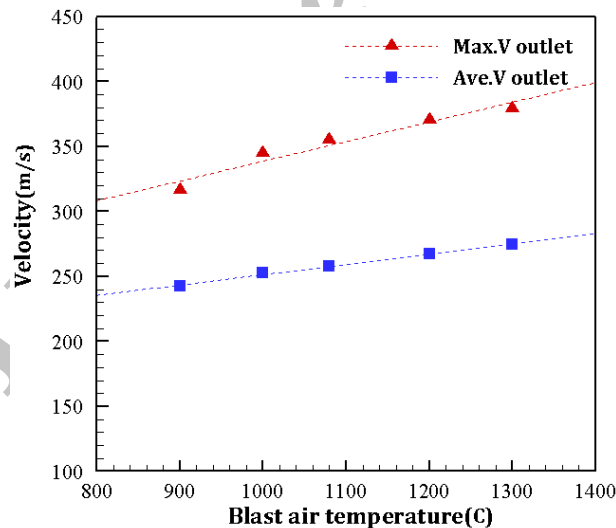


Figure 24- Outlet velocity changes in terms of increasing blast air temperature in natural gas and pulverized coal case

شکل ۲۴- تغییرات سرعت خروجی برحسب افزایش دمای هوای دم در حالت گاز طبیعی و پودر زغال

### نتیجه‌گیری

در کار حاضر، شبیه‌سازی سه‌بعدی احتراق پودر زغال در دهانه لوله دمش کوره‌بلند در کارخانه ذوب‌آهن اصفهان در حالت پایا با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت 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 به تنهایی در دهانه لوله دمش شبیه سازی شد. در حالت سوم هم، احتراق ترکیب سوخت های گاز طبیعی و پودر زغال و اثر پارامترهای دمش بررسی شد. پس از انجام شبیه سازی نتایج زیر حاصل شدند: (۱) استفاده از سوخت های کمکی نظیر گاز طبیعی و پودر زغال در کوره بلند علاوه بر کم کردن هزینه تولید چدن مذاب، مزیت های دیگری از قبیل کاهش مصرف کک متالورژی گران قیمت را به همراه دارد. همچنین، از انتشار گازهای آلاینده ناشی از تولید کک جلوگیری می کند که گامی برای بهبود شرایط زیست محیطی است.

(۲) افزایش درصد اکسیژن در تمامی حالات، افزایش دما و سرعت در خروجی را نتیجه می دهد. این افزایش دما و سرعت ناشی از کمتر شدن نیتروژن و به مراتب 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، به دلیل افزایش انرژی گازهای ورودی، افزایش دما و سرعت در خروجی را نتیجه می دهد.

(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 از قبیل دبی جرمی هوای دم، دبی جرمی گاز طبیعی و دبی جرمی فرضی پودر زغال، باعث ایجاد ناحیه دمابالا (حدود ۲۵۰۰ تا ۲۸۰۰ درجه کلون 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 به عنوان سوخت کوره دمای خروجی کمتری را نسبت به استفاده از گاز طبیعی نتیجه می دهد. این اختلاف دما ناشی از کمتر بودن 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.
2. 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. Araujo, 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  $k - \epsilon$  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