

ارائه رهیافتی علمی در کاهش آلاینده‌گی صنایع فولاد استان اصفهان

محمد مهدی اسماعیلی^{۱*}، مصطفی اسماعیلی^۲، هادی امیرشقایق^۳

۱- دکترای علوم سیاسی و کارشناس پژوهشی دانشکده حقوق و علوم سیاسی دانشگاه تهران

۲- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشکده فنی دانشگاه تهران . mosesmali@ut.ac.ir

۳- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشکده فنی دانشگاه تهران . hashaghghi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۰/۳/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱/۲۰

چکیده

امروزه بحران آلودگی هوا افزون بر تأثیرات زیست محیطی، دارای واکنش‌های اجتماعی و سیاسی نیز است. استان اصفهان با داشتن حجم بالایی از صنایع آلاینده، درگیری بیشتری با این مسئله دارد. از این رو به نظر می‌رسد بهترین راه برای تغییر فضای موجود، ارائه روشهای علمی برای حذف و کاهش میزان آلاینده‌های تولید شده به وسیله صنایع است. با توجه به اهمیت چنین مسئله‌ای، کاهش آلاینده‌گی صنایع فولاد اصفهان در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور باید منابع تولید آلودگی در این صنایع شناسایی شوند. یکی از مهمترین منابع تولید آلودگی، گازهای خروجی از کوره‌های قوس الکتریکی بوده که حاوی مقادیر زیادی از مونواکسیدکربن و ذرات معلق است. یکی از تجهیزاتی که در این تحقیق به معرفی و شبیه‌سازی عددی آن اقدام شده است، سیستم‌های جذب دوده و غبار هستند که از طریق انجام واکنش‌های احتراقی و روشهای مختلف فیلتراسیون منجر به حذف گازهای آلاینده و ذرات غبار همراه با آن می‌شود. در این تحقیق چنین سیستمی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد تحلیل قرار گرفته و تأثیر تغییر مشخصه‌های عملکردی روی حذف آلاینده‌ها، کاهش دمای گازها و همچنین غلظت ذرات معلق مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد، افزایش حجم هوای اضافه شده به مخلوط دمای بالا، موجب تبدیل و کاهش غلظت آلاینده‌هایی از قبیل مونواکسیدکربن می‌شود، لیکن با توجه به افزایش تعداد مول‌های واکنش‌دهنده، دما و سرعت مخلوط افزایش، در نتیجه امکان نشست و بازده جداسازی ذرات معلق، کاهش می‌یابد.

کلید واژه

رهیافت علمی، کاهش آلاینده‌گی، صنایع فولاد، سیستم جذب دوده و غبار، دینامیک سیالات محاسباتی

سر آغاز

هشدار گذشت و تعطیلی ۴ روزه فعالیت‌های آموزشی، تجاری و اداری را به دنبال داشت، به نحوی که شاخص AQI در اصفهان، در پاره‌ای از مناطق از مرز ۳۰۰ گذشت (محیط زیست اصفهان، ۱۳۸۹). در تحلیل دقیق آلاینده‌گی که با پدیده وارونگی هوا و عدم جریان باد به این مرحله رسیده بود، در کنار حمل و نقل شهری، نیروگاههای برق و واحدهای صنعتی نقش بسزایی داشتند. به هر ترتیب شرایط جوی سال ۸۹ و امکان ادامه آن، مسئولان و نهادهای مرتبط را به فکر چاره جویی انداخته است. تداوم شرایط فعلی آلاینده‌گی، بتدریج فضای سیاسی و اجتماعی استان را نیز بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد و مباحث دیگری از جمله نحوه پرداخت عوارض آلاینده‌گی را مورد سؤال قرار می‌دهد. طبق قوانین و مقررات کشور واحدهای تولیدی آلاینده محیط زیست که استاندارد و ضوابط حفاظت از محیط زیست را رعایت نمی‌کند، مشمول پرداخت

استان اصفهان با ۱۰۷ هزار کیلومتر مربع در مرکز کشور قرار گرفته است. فارغ از جایگاه والای تاریخی و فرهنگی آن که همیشه از تأثیرگذارترین مناطق کشور در تصمیم‌سازی فرهنگی و سیاسی ایران از دوره‌های گذشته می‌باشد، به لحاظ اقتصادی نیز شرایط ویژه و خاصی دارد. استقرار ۸۰۸۱ واحد صنعتی فعال، اشتغال مستقیم ۲۲۵ هزار نفر در این واحدها، ترانزیت مرکزی حمل و نقل کشور شامل کریدور شرق به غرب و جنوب به شمال و وجود ظرفیت‌های گردشگری، این استان را به یکی از قطب‌های اصلی اقتصادی کشور مبدل کرده است. وجود این توانایی، که فرصت‌های متعددی را در اختیار این استان قرار داده است، اما بتدریج این استان بویژه اصفهان و شهرهای حومه را به یکی از آلوده‌ترین مناطق کشور تبدیل کرده است. شدت این آلاینده‌ها در پاییز ۱۳۸۹ از مرز

مزیت نسبی کشور ما در حوزه صادرات نیز است و طرح‌های توسعه‌ای گسترده‌ای را نیز در دستور کار دارند، توجه کافی شود. با توجه به حجم وسیع فعالیت‌های فعلی و برنامه‌های توسعه‌ای بعدی لزوم ارائه روش‌های کنترل آلاینده‌گی ضرورتی غیر قابل انکار است که در ادامه روش جدیدی معرفی می‌شود.

مواد و روشها

ارائه روش علمی نو برای کنترل آلاینده‌گی

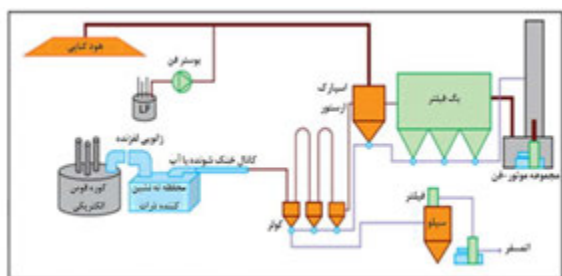
صنایع تولید فولاد از صنایعی هستند که با حجم عظیمی از مواد مصرفی و انرژی سر و کار دارند. بیش از نیمی از ورودی این صنایع در خروجی به شکل دوده و ذرات جامد بوده و در نتیجه مسئله کنترل این حجم عظیم آلاینده‌های محیط زیستی اهمیت زیادی دارد. از میان تکنولوژی‌های مختلف تولید فولاد، استفاده از کوره‌های قوس الکتریکی به منظور ایجاد دماهای بالا و احیای فولاد از اقبال روزافزونی برخوردار است. مطابق آمارهای ارائه شده به وسیله مؤسسات معتبر بین‌المللی، قریب به ۳۵ درصد از تولید ۱۲۲۰ میلیون تنی تولید فولاد دنیا در سال ۲۰۰۹ میلادی با استفاده از این فناوری صورت گرفته (World Steel Association report, 2009) که دلیل اساسی، امکان استفاده از قراضه به عنوان خوراک کوره است، که به فراوانی در دسترس است. نکته نگران کننده این‌که، در این واحدهای صنعتی دما و غلظت آلاینده‌های زیست محیطی گازهای خروجی از کوره بسیار بالا بوده که با ورود به محیط، افزون بر هدررفت مقادیر عظیم انرژی، منشاء جدی آلودگی‌های زیست محیطی است. به این منظور وجود سیستمی برای کاهش دما و غلظت آلاینده‌ها در این واحدهای صنعتی بسیار مهم و حیاتی بوده و توجه فراوانی را در پی داشته است. با توجه به چنین ملاحظاتی استفاده از سیستم‌های جذب و کاهش دمای گاز و غلظت آلاینده‌ها در کوره‌های قوس الکتریکی صنایع فولاد مورد توجه قرار گرفته است.

در طراحی‌های فعلی که به وسیله شرکت‌های صاحب نام در فناوری فولاد از قبیل Tenova Ledoux و WTI توسعه یافته، گازهای آلاینده و ذرات معلق خروجی از کوره با واکنش‌های احتراقی و همچنین سیستم ته‌نشینی از جریان حذف می‌شود. گازهای خروجی^۱ از کوره قوس الکتریکی دارای دمای تقریبی ۱۷۰۰ درجه سانتیگراد بوده و شامل هیدروژن، مونواکسیدکربن، دی‌اکسید کربن، بخار آب، نیتروژن، آرگون و همچنین ذرات معلق از ترکیبات اکسیدهای فلزی است (Steelmaking Handbook, 2010). در

یک درصد از قیمت فروش به عنوان عوارض آلاینده‌گی است. اجرای عواید ناشی از این قانون طبق مصوبه سال ۱۳۸۶ مجلس شورای اسلامی در اختیار شورای شهر و شهرداری شهر قرار گرفت که این واحدها در محدوده شهری قرار دارند (www.icana.ir).

در اصفهان افزون بر پالایشگاه اصفهان، مجتمع فولاد مبارکه و ذوب آهن و چند واحد آلاینده دیگر، به عنوان صنایع عمده مشمول این موضوع هستند. چنین قانونی دارای پاره‌ای محاسن است، لیکن اجرای این قانون با برخی موانع همراه است. از جمله عدم تخصیص و بهره‌مندی شهرهای مجاور این آلاینده از این عوارض. برای نمونه در کنار پالایشگاه اصفهان که در محدوده شاهین شهر قرار دارد، شهر گرگاب با فاصله کمتر از چهار کیلومتر هیچ بهره‌ای از عوارض میلیاردی پالایشگاه ندارد. خمینی شهر که جزو متراکم‌ترین شهرهای کشور به لحاظ جمعیت است و به همین علت از مناطق محروم استان است، به همراه شمال شهر اصفهان که منطقه‌ای حاشیه‌ای و پر مشکل است، ریالی از این عوارض دریافت نمی‌کنند.

همین مسئله در خصوص صنایع فولاد که موضوع اصلی این نوشتار است نیز صادق است. با وجود همجواری شهرستان فلاورجان با ۲۵۰ هزار نفر جمعیت با شهرستان زرین شهر که ذوب آهن در محدوده آن قرار دارد، این شهرستان محروم نیز بهره‌ای از عواید ذوب آهن ندارد. همین ادعا را شهرستان‌های شهرضا و دهقان در خصوص عدم تخصیص عوارض مجتمع فولاد مبارکه دارند. تحلیل واقع بینانه از پرداخت عوارض و تداوم آلاینده‌گی‌ها در شرایط وارونگی هوا، نشان می‌دهد موضوع، توانایی تبدیل از معضل زیست محیطی صرف، به معضل اجتماعی و سیاسی در مرحله اول و بحران در مراحل بعدی را داراست. بررسی فضای مطبوعات و موضع‌گیری‌های صورت گرفته از مقامات مختلف سیاسی و اجرایی و گروه‌های سیاسی که متعاقب تعطیلات ناشی از آلودگی در تهران و اصفهان رخ داد، نشان می‌دهد این مسئله می‌تواند دست‌آویز مناسبی برای بروز پاره‌ای از موضع‌گیری‌های سیاسی نیز قرار گیرد. از این رو به نظر می‌رسد خروج از فضای فعلی، منوط به تلاش برای پاک کردن صورت مسئله و اصل آلودگی است. زیرا از یک سو نه فقط اقتضات جدید فناوری شده استان، اجازه محدودسازی در استفاده آن را نمی‌دهد، بلکه محمل مناسبی برای حل مشکل تولید و اشتغال کشور نیز است، بنابراین ضروری است با بسیج امکانات علمی و پژوهشی، به رفع اساسی این معضل، بویژه در صنایعی که



شکل شماره (۱): شماتیک سیستم جذب دوده و غبار در صنایع

تولید فولاد (VAI Metal Technologies, 2006)

در هم‌اکنون تحقیقات انجام گرفته در ابعاد صنعتی در زمینه کوره‌های قوس الکتریکی در پلنت‌های تولید فولاد، دارای دو سمت‌گیری اساسی است: اول، کاهش انرژی مصرفی و افزایش فرایند و دوم، کاهش غلظت آلاینده‌های زیست محیطی شامل مونواکسید و دی‌اکسید کربن، ذرات معلق و اکسیدهای نیتروژن در گازهای خروجی از کوره. در مطالعات انجام شده توسط محققان مختلف، روشهای مختلفی برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. برای نمونه، Kirschen و همکاران (2005) با توجه به حجم بسیار بالای محاسبات در روشهای دینامیک سیالات محاسباتی، از حل معادلات صفر بعدی ترمودینامیکی و بقای جرم و انرژی استفاده کرده و پس از رسم نمودارهای دما و نسبت‌های جرمی اجزای حاصل از شبیه‌سازی، مقادیر بهینه ورودی را پیشنهاد کردند.

می‌باید اذعان کرد، که استفاده از مدل‌های ترمودینامیکی برای مدل‌سازی، دارای پاره‌ای از مزایا از قبیل سادگی روند حل و عدم نیاز به انجام عملیات محاسباتی سنگین است، لیکن چنین مدل‌هایی به توجه به ساده‌سازی‌های بیش از اندازه و عدم لحاظ نمودن مشخصه‌های کلیدی از قبیل توربولانس و نقش آن در اختلاط و احتراق جریان‌های سوخت و هوا، هندسه پیچیده سیستم و نقش آن روی فیزیک جریان و بالاتر از همه ناتوانی از مدل‌سازی ذرات معلق و ته‌نشینی این ذرات در طول مسیر، دارای مشکلات بسیار جدی است. از سوی دیگر، در پاره‌ای از مطالعات انجام شده، که توسط محققانی از قبیل Ko و همکاران (2005)، Goodfellow و همکاران (2006) و Zhonghua و همکاران (2008) انجام گرفته است، از ابزار دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی سیستم استفاده شده است؛ اما افزون بر عدم لحاظ کردن برخی از مشخصه‌های کلیدی از قبیل تشعشع، آثار سه بعدی و حضور ذرات معلق در داخل جریان، در پایان از روش ساخت یافته‌ای برای

سیستم‌های حذف دوده و غبار^۲ این گازها در طول کانال خنک شده با آب، حرکت کرده وارد کانال زانویی شکل می‌شود (شکل ۱). هوای مورد نیاز برای انجام واکنش‌های احتراقی، از طریق فضای خالی موجود بین زانویی و لغزنده و در اثر فشار نسبی منفی گازها به داخل سیستم مکیده می‌شود. در ادامه، جریان دو فاز گاز-جامد وارد محفظه ته‌نشین‌کننده/احتراق^۳ می‌شود. در محفظه یاد شده با تغییر ناگهانی سطح مقطع، سرعت جریان به صورت ناگهانی کاهش یافته، با افت سرعت ذرات معلق به زیر سرعت حدی، این ذرات در اثر نیروهای گرانشی از بالک جدا شده و در کف محفظه ته‌نشین می‌شوند. پس از این مرحله گاز وارد کانال دیگری شده (این کانال نیز با آب خنک می‌شود) و در پایان با کاهش دمای گاز، آن را به نصف دمای اولیه تقلیل می‌دهد. در نتیجه جریان گاز وارد مبدل خنک‌شونده با هوا^۴ شده و با انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد گاز خنک شده و دمای آن را به حد قابل قبولی کاهش می‌یابد.

با اندکی تأمل آشکار می‌شود که مشخصه‌های مؤثر بر عملکرد چنین سیستمی بسیار گسترده و وسیع هستند. به طور نمونه ترکیب اجزای غلظت آلاینده‌ها و غلظت ذرات معلق در گاز خروجی از کوره بشدت بر ماهیت جریان واکنشی و عملکرد سیستم اثرگذار است (Velikordov, 2006).

همچنین عواملی مانند دبی آب خنک‌کن، دمای آب خنک‌کن، هندسه و مقاطع استفاده شده برای لوله‌ها، جنس و میزان زبری لوله‌ها، افزون بر تأثیر روی میزان اختلاط و احتراق جریان سوخت و اکسیدایزر با تغییر میزان آشفته‌گی جریان، فیزیک جریان را تحت تأثیر قرار داده، موجب تغییر میزان ته‌نشینی ذرات معلق، دمای میانگین جریان و ترکیب شیمیایی سیال می‌شود. بنابراین، به منظور دستیابی به عملکرد مناسب، بررسی رفتار سیستم تحت اثر تک‌تک این مشخصه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. از سوی دیگر، امکان مطالعه چنین مشخصه‌هایی به صورت تجربی در سیستمی صنعتی بسیار دشوار، پرهزینه و حتی غیرممکن است.

با توجه به چنین مسئله‌ای، استفاده از امکان شبیه‌سازی سیستم به کمک ابزار دینامیک سیالات محاسباتی راه حلی بسیار مناسب بوده و با توجه به پیچیدگی مسئله و دشواری دسترسی به شرایط و اطلاعاتی از قبیل دما، فشار و ترکیب شیمیایی تمام نقاط در داخل سیستم، همواره از ارزش بالایی برخوردار بوده و به‌وسیله گروه‌های تحقیقاتی در دانشگاهها و مراکز صنعتی مورد اقبال روزافزون قرار گرفته است.

معادلات حاکم

مدل ریاضی فرایندهای داخل ناحیه محاسباتی از پنج قسمت اصلی تشکیل شده است: جریان توربولنت، انتقال حرارت و جرم به وسیله جابه‌جایی، جریان ذرات جامد، واکنش‌های شیمیایی و تشعشع. به این منظور می‌باید معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی (شامل انتقال حرارت به روش تشعشع)، معادلات انتقال اجزای شیمیایی و معادلات مربوط به مدل‌سازی جریان مغشوش (در شکل متوسط گیری شده نسبت به زمان) برای فاز پیوسته^۱ و معادلات حرکت ذرات جامد به عنوان فاز گسسته^۲ (با در نظر گرفتن برهم کنش دو فاز) به صورت همزمان حل شوند.

مدل‌سازی جریان توربولنت فاز پیوسته

مدل جریان توربولنت از معادلات پیوستگی، ممنتوم برای سرعت در امتدادهای محوری شعاعی و مماسی و انتقال برای K, ϵ تشکیل شده است. معادله بقای جرم کلی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه ρ چگالی مخلوط و \bar{u} بردار سرعت سیال است. همچنین معادله مومنتوم در جریان مغشوش داریم و غیرقابل تراکم به صورت زیر خواهد بود:

$$\nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \bar{g} \quad (2)$$

که در آن $\bar{\tau}$ تانسور تنش و به صورت زیر است:

$$\tau_{ij} = \mu [(\nabla u_i + \nabla u_j^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{u} I] - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (3)$$

که I تانسور واحد، u_i مؤلفه بردار سرعت \bar{u} و عبارت $\rho \bar{u}_i \bar{u}_j$ معرف تنش‌های رینولدز بوده و با استفاده از تقریب بوزینسک به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial u_j} + \frac{\partial u_j}{\partial u_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial u_i} \delta_{ij} \quad (4)$$

برای مدل‌سازی اغتشاش در جریان سیال، به دلیل وجود جریان‌های چرخشی قوی، از مدل RNG K- ϵ استفاده شد. در واقع مدل K- ϵ استاندارد در نواحی با چرخش شدید و انحنای بالا، پیش‌بینی غیرواقعی (بیش از اندازه) از انرژی آشفتگی به دست می‌دهد (Lauder and Spalding, 1972) و به این ترتیب با انتقال این انرژی آشفتگی به پایین دست جریان، تقریب‌های غیر

بهینه‌سازی سیستم مورد مطالعه استفاده نشده است. در یک جمع‌بندی می‌توان گفت که در تحقیقات انجام شده تا به امروز تأثیر مشخصه‌های مختلف روی فرایند جذب دوده و غبار، عموماً به صورت محاسباتی و با استفاده از مدل‌های یک بعدی و بدون لحاظ کردن آثار هیدرودینامیکی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند؛ که نیاز به مطالعه‌ای جامع، مشتمل بر تأثیرات متقابل واکنش‌های شیمیایی، جریان سیال مغشوش و ذرات معلق را آشکار می‌سازد (Clift et al, 1978).

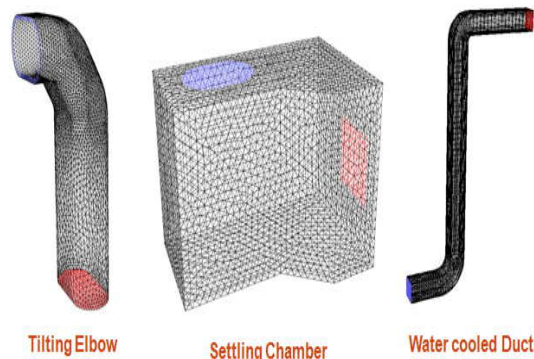
در مطالعه جریان احتراقی آشفته دوفاز، در کل سیستم جذب دوده مدل‌سازی شده که می‌توان از نتایج آن به منظور ارتقای فناوری شده صنایع فولاد در کشور استفاده کرد. این کار افزون بر صرفه‌جویی اقتصادی، به بومی شدن این دانش در کشور نیز کمک می‌کند.

شرح مسئله و معادلات حاکم

هندسه میدان و شبکه محاسباتی

هندسه میدان با توجه به اطلاعات ارائه شده به وسیله نرم افزار سالید ورکز^۳ ترسیم شده و سپس تحت فرمت IGES به نرم افزار گمبیت^۴ منتقل و شبکه محاسباتی تولید شده است. شکل شبکه‌های تولید شده در شکل شماره (۲) نشان داده شده است.

شایان ذکر است سلول‌های استفاده شده برای شبکه‌بندی هر یک از سه بخش از نوع تتراهدرال انتخاب و تعداد ۵۰۰۰۰۰ سلول مناسب تشخیص داده شد. در نهایت شبکه محاسباتی تولید شده وارد نرم‌افزار فلونت^۵ شده و معادلات حاکم بر جریان، انتقال حرارت و واکنش‌های شیمیایی با لحاظ تشعشع گازهای داغ و فاز گسسته به صورت عددی حل شد.



Tilting Elbow

Settling Chamber

Water cooled Duct

شکل شماره (۲): شبکه محاسباتی برای سه بخش مختلف

ناحیه محاسباتی در سیستم جذب دوده و غبار (منبع: نگارندگان)

تشعشی هستند. مقدار انتالپی کل برای هرگونه شیمیایی از روابط زیر به دست می‌آید:

$$h = \sum m_j h_{j'} \quad (10)$$

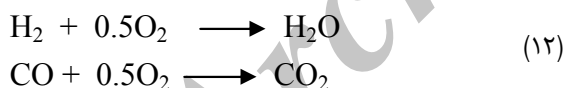
$$h_{j'} = \int_{T_{ref}}^T C_{p_{ij'}} dT$$

همچنین مقدار جمله چشمه انرژی ناشی از واکنش‌های شیمیایی از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$S_{h, reaction} = \sum_{j'} \left[\frac{h_{j'}^0}{M_{j'}} + \int_{T_{ref}}^{T_{refj'}} c_{p_{ij'}} dT \right] R_{j'} \quad (11)$$

مدل سازی واکنش‌های شیمیایی

وجود واکنش‌های شیمیایی در جریان توربولنت پیچیدگی حل را دو چندان می‌کند. به طوری که سازوکار احتراق هیدروکربن‌های ساده شامل صدها واکنش میانی است که استفاده از فرض‌های ساده‌کننده را گریزناپذیر می‌کند. در این تحقیق از مدل پخش گردابه^۱ استفاده شده است، که بر اساس مدل پیشنهادی (Magnussen and Hjertager, 1976) توسعه یافته است. فرض اساسی در این مدل سرعت بسیار بالای انجام واکنش‌های شیمیایی در مقایسه با نرخ اختلاط توربولانت و در نتیجه کنترل نرخ واکنش توسط اختلاط توربولانت است. واکنش احتراقی مونواکسیدکربن و هیدروژن نیز به صورت زیر در نظر گرفته شد:



مدل سازی تشعشع

برای مدل سازی انتقال حرارت تشعشی؛ از مدل PI با فرض محیط بدون پراکنش استفاده شده است.

$$\frac{dI}{dS} + aI = \frac{a\sigma T^4}{\pi}$$

$$\frac{\alpha(I S_i)}{dx_i} + (\alpha + a_p + \sigma_p) I(r, s) = \quad (13)$$

$$an^2 \frac{\sigma T^4}{k} + E_p + \frac{\sigma s}{ax} \int_0^{4\pi} I(r, s) \varphi(s, s) d\Omega$$

مدل سازی فاز گسسته

در این مقاله با توجه به ابعاد ریز ذرات از اثر فاز گسسته بر فاز پیوسته صرف نظر شده و فقط فاز پیوسته بر روی حرکت ذرات تأثیرگذار خواهد بود. در نرم افزار فلوئنت مسیر ذرات فاز گسسته، با

واقعی و جدایش جریان را به دست می‌دهد. مدل K-ε RNG شامل دو معادله به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i}) + G_k + G_b - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}) + \quad (6)$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R$$

که در آن G_k نرخ تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از تغییرات سرعت متوسط، G_b مقدار تولید نرخ تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از شناوری است. لزجت اغتشاش نیز از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (7)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon}$$

که در این روابط:

$$\begin{aligned} \beta &= 0.012 \\ \eta_0 &= 4.38 \end{aligned} \quad (8)$$

است.

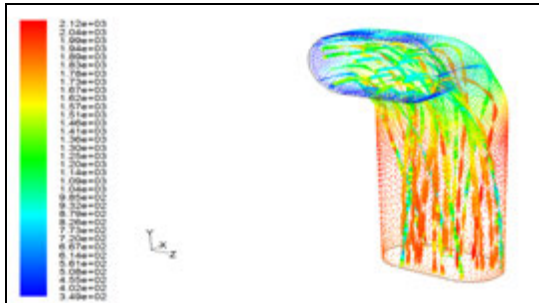
معادله انرژی

معادله انرژی برای جریان احتراقی به صورت زیر است:

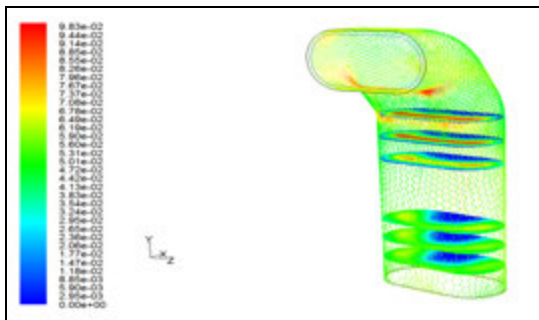
$$\nabla \cdot (\bar{u}(\rho h)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum h_j J_{j'} + \tau_{ik} + S_{h, reaction} + S_{h, radiation}) \quad (9)$$

که در آن $J_{j'}$ نفوذ جزء شیمیایی j' است و سه ترم اول سمت راست معادله به ترتیب نشان دهنده انتقال انرژی از طریق هدایت، نفوذ اجزای شیمیایی و استهلاک ویسکوز هستند. همچنین $S_{h, radiation}$ و $S_{h, reaction}$ به ترتیب نشان دهنده میزان چشمه انرژی ناشی از واکنش‌های شیمیایی و میزان چشمه ناشی از انتقال حرارت

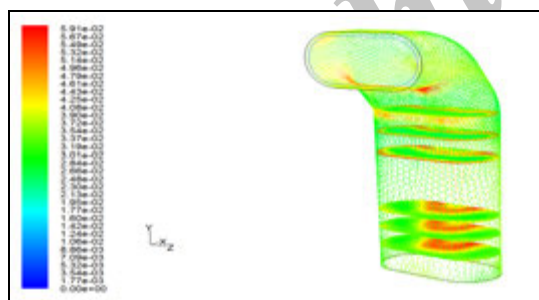
بالاتری از گونه‌های شیمیایی بدون درگیر شدن در واکنش شیمیایی در این ناحیه حضور خواهند داشت.



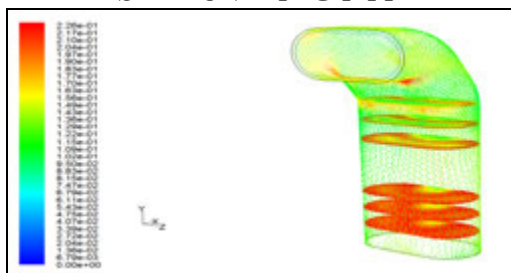
شکل شماره (۳): خطوط جریان و بردارهای سرعت و کانتورهای دما در داخل زانویی لغزنده (منبع: نگارندگان)



شکل شماره (۴): کسر جرمی مونوکسیدکربن (CO) در زانویی لغزنده (منبع: نگارندگان)



شکل شماره (۵): کسر جرمی دی اکسیدکربن (CO₂) در زانویی لغزنده (منبع: نگارندگان)



شکل شماره (۶): کسر جرمی بخار آب (H₂O) در زانویی لغزنده (منبع: نگارندگان)

کمک تعادل نیرو روی هر ذره که حرکت آن در چارچوب لاگرانژی نوشته شده می‌شود.

طبق این تعادل نیرو، اینرسی ذره با نیروهای اعمالی بر آن متعادل می‌شود و به عنوان نمونه در جهت x در مختصات کارتزین به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D (u - u_p) + \frac{g_x (\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (14)$$

جایی که F_x ، نشان‌دهنده شتاب اضافی (نیرو بر واحد جرم ذره) و $F_D (u - u_p)$ ، عبارت مربوط به نیروی پسا است. F_D به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \quad (15)$$

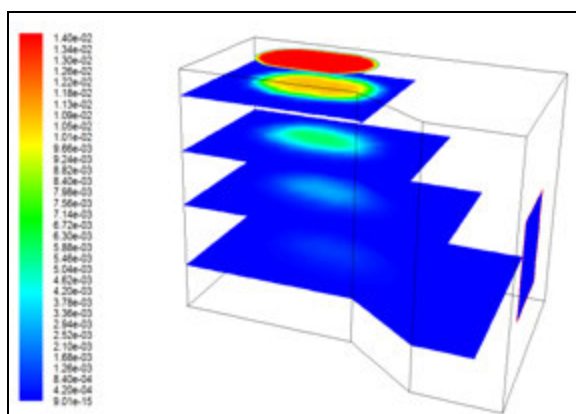
در معادلات بالا، u سرعت فاز پیوسته، u_p سرعت فاز گسسته، μ ویسکوزیته مولکولی، ρ چگالی سیال، ρ_p چگالی ذره و d_p قطر ذره است.

نتایج شبیه‌سازی

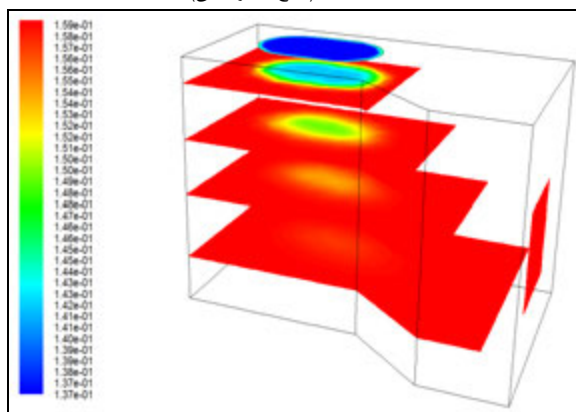
در این بخش به بررسی و تحلیل نتایج به‌دست آمده از حل عددی جریان دوده و غبار در سیستم جذب دوده پرداخته می‌شود. در شکل (۳) خطوط جریان و بردارهای سرعت به همراه تغییرات دما در داخل زانویی لغزنده به نمایش درآمده است. با ورود جریان هوای محیط و ترکیب آن با هیدروژن و مونوکسیدکربن احتراق رخ می‌دهد. همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شود، در اثر احتراق، و با واکنش و اختلاط تدریجی سوخت و اکسیدایزر، کسر جرمی مونواکسیدکربن و هیدروژن کاهش و دمای گازهای خروجی و کسر جرمی دی‌اکسیدکربن و بخار آب افزایش خواهد یافت. چنین تغییر و تحولی در شکل‌های شماره (۳ تا ۶) مشهود است.

در این کانتورها، که مشخصه‌های مختلف حاکم بر جریان در مقاطع مختلف در امتداد طول کانال نمایش داده شده است، دو جریان سوخت (شامل هیدروژن و مونوکسیدکربن) و اکسیژن موجود در جریان هوای ورودی، در اثر اختلاط توربولانت و ورتکس‌های ناشی از وجود زانویی، در واکنش‌های احتراقی شرکت نموده و با توجه به ماهیت گرم‌زای واکنش‌های یاد شده، منجر به افزایش دمای توده گاز و تولید اجزای شیمیایی بخار آب و دی‌اکسیدکربن خواهد شد.

چنین اختلاطی در هسته کانال شدیدتر بوده و با حرکت به سمت دیواره‌ها، به علت غلبه لزجت، کاهش می‌یابد. بنابراین درصد

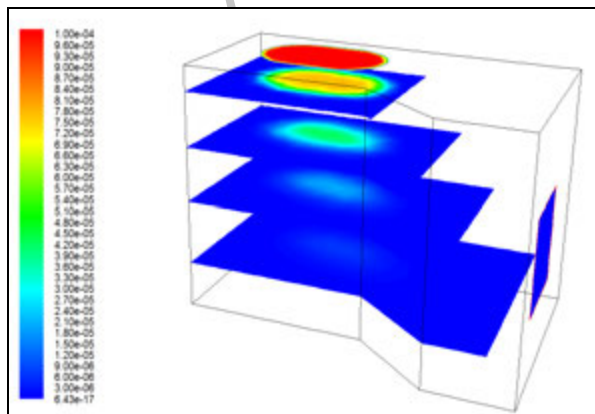


شکل شماره (۸): کسر جرمی مونوکسیدکربن (CO) در داخل محفظه (منبع: نگارندگان)



شکل شماره (۹): کسر جرمی مونوکسیدکربن (CO₂) در داخل محفظه ته نشین کننده ذرات (منبع: نگارندگان)

همان‌طور که در مطالب قبل ذکر شد، یکی از مهمترین اهداف سیستم‌های جذب دوده و غبار در صنایع تولید فولاد کاهش میزان غبار در خروجی از کوره‌های قوس الکتریکی است. این هدف مهم در محفظه ته‌نشین کننده ذرات عملی می‌شود.



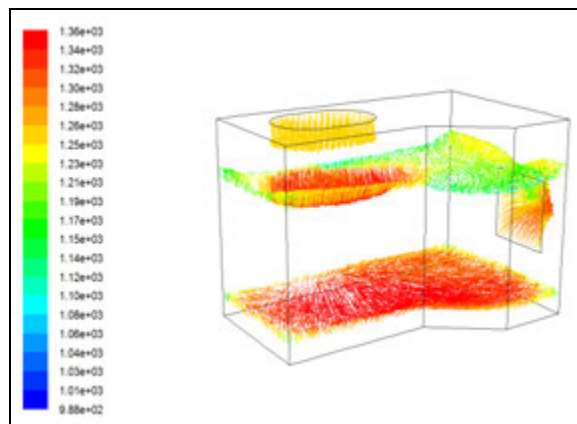
شکل شماره (۱۰): کسر جرمی هیدروژن (H₂) در داخل محفظه ته نشین کننده ذرات (منبع: نگارندگان)

شایان ذکر است که طراحی مناسب زانویی لغزنده ضمن ایجاد شانس اختلاط مناسب برای دو جریان سوخت و هوا با تنظیم مقدار هوای ورودی به سیستم، امکان انجام بخش عمده‌ای از واکنش‌های شیمیایی را در داخل لوله زانویی شکل فراهم کرده، فقط بخش کوچکی از دو جریان سوخت و هوا که در مجاورت دیواره لوله هستند، وارد محفظه ته‌نشینی می‌شود.

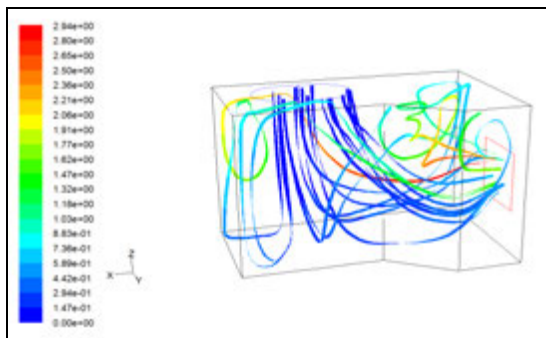
این محفظه به گونه‌ای طراحی شده است که ضمن کاهش سرعت جریان (در اثر افزایش ناگهانی سطح مقطع)، با ایجاد گردابه‌هایی در گرداگرد محفظه، زمان ماند و در نتیجه امکان ته‌نشینی ذرات معلق همراه با جریان را افزایش دهد. افزون بر این مقادیر کم باقیمانده هیدروژن و مونوکسیدکربن نیز در داخل این محفظه، وارد واکنش‌های احتراقی شده و حذف می‌شود.

در شکل شماره (۷) بردارهای سرعت رنگ آمیزی شده با دما در داخل محفظه ته‌نشین کننده دما نشان داده شده است. در مورد تغییرات دما دو نکته قابل توجه است. تغییر دما در این محفظه از طرفی در اثر احتراق اکسیژن موجود در دوده با باقیمانده ناچیز مونوکسیدکربن و هیدروژن افزایش یافته و از طرف دیگر در اثر انتقال حرارت جابه‌جایی با دیواره خنک شونده با آب کاهش می‌یابد. برآیند این دو اثر موجب کاهش دما به مقدار کمی در محفظه ته‌نشین کننده خواهد شد.

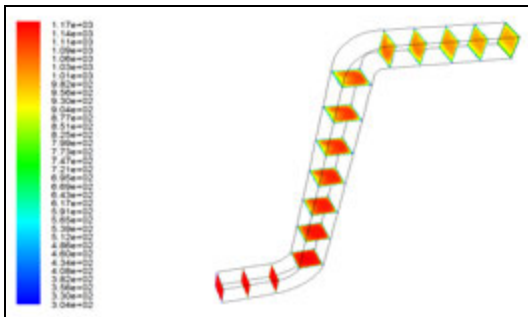
به‌مانند رفتاری که در زانویی لغزنده داشتیم، در اثر احتراق، کسر جرمی مونوکسیدکربن و هیدروژن کاهش (می‌توان گفت که به سمت صفر میل می‌کند) و کسر جرمی دی‌اکسیدکربن و بخار آب افزایش می‌یابد (شکل‌های شماره ۸ تا ۱۰).



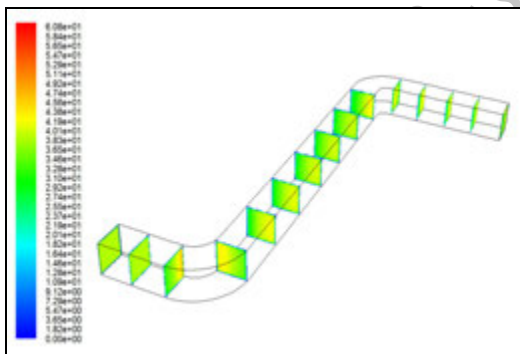
شکل شماره (۷): بردارهای سرعت و کانتورهای دما در داخل محفظه ته نشین کننده ذرات (منبع: نگارندگان)



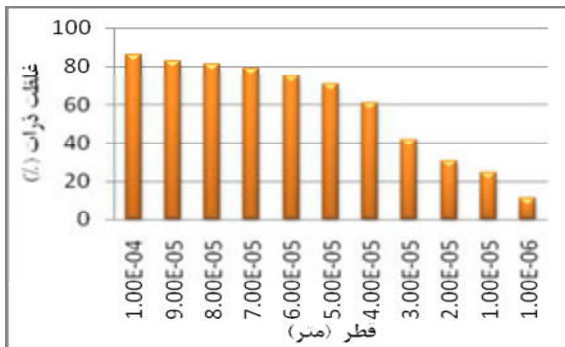
شکل شماره (۱۲): خطوط جریان دوده داغ در محفظه ته نشین کننده ذرات (منبع: نگارندگان)



شکل شماره (۱۳): توزیع دما در مقاطع مختلف کانال خنک شونده با آب (منبع: نگارندگان)



شکل شماره (۱۴): توزیع سرعت در مقاطع مختلف کانال خنک شونده با آب (منبع: نگارندگان)



شکل شماره (۱۵): توزیع کمی درصد ذرات باقیمانده در خروجی محفظه ته نشین کننده ذرات (منبع: نگارندگان)

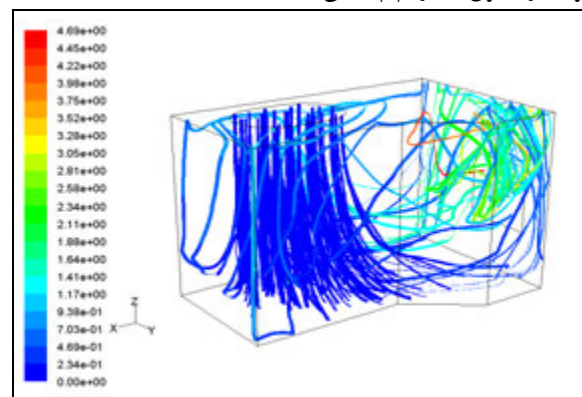
شکل شماره (۱۱) مسیر ذرات ورودی به این محفظه را نشان می‌دهد. مسیر ذرات ریز در محفظه رابطه تنگاتنگی با خطوط جریان دارد که در شکل شماره (۱۲) نشان داده شده‌اند. در واقع عامل حرکت ذرات به عنوان فاز گسسته کاملاً به حرکت توده سیال (فاز پیوسته) بستگی دارد.

همان‌طور که مشخص است بخش عمده ذرات تحت اثر جاذبه و اینرسی اولیه خود به سمت پایین محفظه رفته و بخش کمی به طرف خروجی می‌روند. در واقع ذراتی که به سرعت حد خود می‌رسند سقوط کرده و بقیه ذرات به سمت خروجی محفظه می‌روند. با پایان یافتن هیدروژن و مونوکسید کربن در انتهای محفظه ته‌نشین‌کننده ذرات، در کانال خنک شونده با آب دیگر شاهد احتراق نبوده و صرفاً دمای گازهای داغ کاهش می‌یابد (شکل‌های شماره ۱۳ و ۱۴). در انتهای این کانال از یک دمپر هوا استفاده شده است. با کمک این دمپر می‌توان هوای ترکیب شونده با سوخت را کم و زیاد و در نتیجه دمای خروجی را تنظیم کرد.

شکل شماره (۱۵) برای نمایش توزیع کمی درصد ذرات باقیمانده، در خروجی محفظه ارائه شده است. همان‌طور که از این نمودار مشهود است درصد زیادی از ذرات با اندازه بزرگ در محفظه سقوط کرده و بخش اعظم ذرات خروجی را ذرات ریزتر تشکیل می‌دهند.

در انتها دما، چگالی و میزان غبار ذرات در مقاطع مختلف سیستم جذب دوده در جدول شماره (۱) و کسر جرمی گونه‌های شیمیایی مختلف موجود در دوده نیز در مقاطع مختلف سیستم جذب دوده در جدول شماره (۲) به نمایش در آمده است.

ضمناً میزان افت فشار در قسمت‌های مختلف سیستم جذب دوده در جدول شماره (۳) نشان داده شده است.



شکل شماره (۱۱): مسیر ذرات فاز گسسته در مسیر ته داخل محفظه ته نشین کننده ذرات (منبع: نگارندگان)

جدول شماره (۱): دما، چگالی و غبار ذرات در مقاطع مختلف سیستم جذب دوده

| غلظت ذرات (gr/Nm^3) | دانسیتته (kg/m^3) | دما (کلوین) | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------|-----------------------------|
| --- | ۰/۲۶۱ | ۱۶۵۳ | ورودی دوده در زانویی لغزنده |
| ---- | ۱/۰۱۶ | ۳۵۰ | ورودی هوا در زانویی لغزنده |
| ۲۵ | ۰/۲۸۹ | ۱۲۴۷/۳ | ورودی محفظه ته نشین کننده |
| ۱۴/۳ | ۰/۲۹۹ | ۱۳۱۰ | ورودی کانال خنک شونده با آب |
| --- | ۰/۳۹۹ | ۹۱۷ | خروجی کانال خنک شونده با آب |
| --- | ۰/۶ | ۷۹۵ | بعد از دمپر هوا |

جدول شماره (۲): کسر جرمی گونه‌های شیمیایی مختلف موجود در دوده در مقاطع مختلف سیستم جذب دوده

| Ar (%) | CO (%) | CO ₂ (%) | N ₂ (%) | H ₂ (%) | H ₂ O (%) | O ₂ (%) | |
|--------|--------|---------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|-----------------------------|
| ۰/۰۰۹۵ | ۰/۱۴ | ۰/۱۳۱ | ۰/۵۲۴ | ۰/۰۲۷۹ | ۰/۰۳۸ | ۰/۱۲۷ | ورودی دوده در زانویی لغزنده |
| ۰/۰۰۱ | ۰ | ۰ | ۰/۷۱ | ۰ | ۰ | ۰/۲۱۱ | ورودی هوا در زانویی لغزنده |
| ۰/۰۰۴ | ۰/۰۰۶۵ | ۰/۱۰۷ | ۰/۷۱ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۲۶۵ | ۰/۱۴۷ | ورودی محفظه ته نشین کننده |
| ۰/۰۰۴ | ۰ | ۰/۱۱۴ | ۰/۷۱ | ۰ | ۰/۰۲۷۶ | ۰/۱۲۵ | ورودی کانال خنک شونده با آب |
| ۰/۰۰۴ | ۰ | ۰/۱۱۴ | ۰/۷۱ | ۰ | ۰/۰۲۷۶ | ۰/۱۲۵ | خروجی کانال خنک شونده با آب |

جدول شماره (۳): میزان افت فشار در بخش‌های مختلف سیستم جذب دوده

| مجموع | انقباض ناگهانی در مسیر جریان | کانال خنک شونده با آب | محفظه ته نشین کننده | زانویی لغزنده | افت فشار (پاسکال) |
|-------|------------------------------|-----------------------|---------------------|---------------|-------------------|
| ۳۶۳ | ۱۹ | ۱۲۹ | ۱۲۶ | ۸۹ | |

واکنش دهنده‌ها، دما و سرعت مخلوط افزایش و در نتیجه امکان نشست و بازده جداسازی ذرات معلق، کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان سیال دو فازی در محفظه ته‌نشینی و مطالعه الگوهای جریان در آن، تأثیر تغییرات ناگهانی هندسی محفظه روی تشکیل گردابه‌ها و متعاقباً افزایش زمان ماند سیال در داخل محفظه و در نتیجه افزایش بازده ته‌نشینی مورد بررسی قرار گرفت.

یادداشت‌ها

- 1- Fume
- 2- Fume dedusting system
- 3-Settling/combustion chamber
- 4- Natural cooler
- 5- Solid Works Software
- 6- Gambit
- 7- Fluent Inc. Software
- 8- Continuous phase
- 9- Discrete phase
- 10- Eddy dissipation

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه سیستم‌های جذب دوده و غبار که در پلنت‌های تولید فولاد و به منظور حذف آلاینده‌ها و ذرات معلق خروجی از کوره‌های قوس الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی و مدل‌سازی شده است. مقادیر پیش‌بینی شده برای دما و ترکیب گازهای خروجی با مشخصه‌های عملکردی سیستم جذب دوده و غبار مجتمع فولاد مبارکه مقایسه شد. در ادامه و پس از اعتبارسنجی مدل توسعه یافته، الگوهای جریان سیال احتراقی دو فازی در قسمت‌های مختلف سیستم جذب دوده و غبار مورد مطالعه قرار گرفته و همچنین تأثیر میزان بازشدگی دریچه ورودی هوا به عنوان مهم‌ترین متغیرهای کنترلی سیستم، روی دما و ترکیب گازهای خروجی از سیستم مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده بروشنی مشخص می‌کند که افزایش حجم هوای اضافه شده به مخلوط دما بالا، موجب تبدیل و کاهش غلظت آلاینده‌هایی از قبیل مونواکسید کربن می‌شود، لیکن با توجه به افزایش تعداد مول‌های

منابع مورد استفاده

- خبرگزاری مجلس شورای اسلامی "خانه ملت"، www.icana.ir.
- شرک سهامی ذوب آهن اصفهان، www.esfahansteel.com.
- شرکت فولاد مبارکه اصفهان، www.mobarakeh-steel.ir.
- گزارش سازمان محیط زیست به استانداری اصفهان در مورد میزان آلاینده‌ها در اصفهان، پاییز ۱۳۸۹.
- Clift, D., J.D., Grace, G., Weber. 1978. Bubbles, Drops, and Particles. Technical report, Academic Press.
- Dedusting Solutions Handbook. 2006. Siemens-VAI Metal, Italy, Castellanza, pp. 120-143.
- Goodfellow, H.D., et al. 2006. Dynamic process control and optimization for EAF steelmakers. MPT Metallurgical Plant and Technology International, Vol. 29(6), PP. 24-30.
- Kirschen, M., et al. 2005. NOx emission from electric arc furnace in steel industry: Contribution from electric arc and co-combustion reactions. Clean Technologies and Environmental Policy, Vol. 7(4), PP. 236-244.
- Ko, D.W., et al. 2005. Use of CFD for effective dust capture in a steelmaking plant with an electric ARC furnace. SEAI Quarterly, Vol. 34(4), PP. 65-73.
- Launder, B.E., D.B., Spalding. 1972. Lectures in Mathematical Models of Turbulence; Academic Press, London, England.
- Magnussen, B.F., B.H., Hjertager. 1976. On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. 16th Symp. (Int'l.) on Combustion, The Combustion Institute.
- Mehta, B. 2008. Modeling of an Industrial Off-Gas Cleaning System, MSc Thesis, Laurentian University (Canada).
- The State-of-Art Clean Technologies for Steelmaking Handbook. 2010. Asia Pacific Partnership for Clean Development and Climate, 2nd Edition.
- Velikordov, V. 2006. Mathematical Modeling of heat transfer in dedusting plants and comparison to off-gas measurements at electric arc furnaces. Journal of Energy, Vol. 31, pp 2926-2939.
- Worldwide Crude Steel Statics. 2009. World Steel Association, London, pp 21-26.
- Zhonghua, W.A. 2008. Optimization of post combustion in an electric arc furnace for advanced steelmaking. 3rd International Conference on Processing Materials for Properties.