

## شبیه سازی جریان محترق دوفاز در یک بستر سیال محترق

سید حمزه سیادت<sup>۱\*</sup>، رضا ابراهیمی<sup>۲</sup>، مهرزاد شمس<sup>۳</sup>

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مکانیک

(\* نویسنده مخاطب: shsiyadat@yahoo.com)

### چکیده

هدف از این مقاله توسعه مدل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به عنوان روشی موثر در تحلیل و بهینه سازی فرآیندهای تبدیل انرژی در شبیه سازی احتراق سوخت زباله در بستر سیال محترق می باشد. افزایش قدرت رایانه ها در سال های اخیر این هدف را قابل دسترس می کند. در این مقاله مدل سه بعدی یک بویلر از نوع بستر سیال محترق همراه با لوله های موجود در آن شبیه سازی شده است. ذرات پسماند به عنوان فاز گسسته ای فرض شده اند که در فاز پیوسته موجود می سوزند. از مدل احتراق غیر پیش مخلوط در مدل سازی احتراق استفاده می شود. به دلیل اهمیت بالای مکانیزم انتقال حرارت تشعشع از مدل قدرتمند DO استفاده خواهد شد. در قسمت آخر این مقاله نتایج به دست آمده از این شبیه سازی بیان می شوند و تطابق رضایت بخش بین داده های تجربی و نتایج عددی مشاهده خواهد شد. اعتبار نتایج عددی ثابت می کند که مدلسازی CFD روشی قدرتمند در درک بیشتر رفتار یک بستر سیال محترق واقعی با سوختی غیر معمول است.

واژه های کلیدی: احتراق - زباله - مواد فرآر - ذغال

### ۱- مقدمه

استفاده روز افزون از منابع نفت و گاز در ایران خطرات زیادی را به دنبال دارد. محدود بودن این منابع و افزایش آلودگی محیط زیست، لزوم استفاده از انرژی های دیگر و روش های بهتر را افزایش می دهد. در این میان بستر سیال محترق یکی از روشهای مناسبی است که رواج زیادی در دنیا پیدا کرده است. در این روش ذرات جامد به وسیله جریان هوا در فضا معلق شده و سپس می سوزند. این کار علاوه بر افزایش راندمان حرارتی، باعث کاهش تولید آلاینده ها می شود. سوخت های متنوعی در این نوع بویلر اعم از ذغال سنگ، زیست توده و زباله مورد استفاده قرار می گیرند. سوزش زباله در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از مزایای این کار علاوه بر کاهش مشکلات ناشی از دفن زباله ها، تولید توان از سوختی است که بسیار ارزان بوده و در همه جا یافت می شود. البته نباید هزینه های مربوط به فراوری زباله را نادیده گرفت.

در این پژوهش سوخت جامد مورد استفاده، زباله می باشد که در یک بویلر از نوع بستر سیال می سوزد و از گرمای حاصل از احتراق آن برای گرم کردن آب و تولید توان استفاده می شود. شبیه سازی بستر سیال محترق کاری دشوار است و نیازمند در نظر گرفتن فرآیندهای فیزیکی متعددی است. احتراق سوخت جامد، تغییر فاز، اغتشاش و انتقال حرارت تابشی از مواردی است که باید در این شبیه سازی مورد توجه قرار گیرند. مدل سازی را با استفاده از کد تجاری Fluent 6.3 انجام می دهیم و نتایج حاصل را با نتایج تجربی بویلر مربوطه اعتبار سنجی می کنیم.

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

## ۱-۱- هیدرودینامیک معلق سازی

هنگامی که یک سیال از داخل یک بستر با ذرات جامد با دبی بسیار کم به سمت بالا عبور می کند، سیال از داخل فضای خالی بستر بدون پراکنده کردن ذرات عبور می کند. این وضعیت معرف یک بستر ساکن است. اگر دبی بسیار زیاد باشد ذرات به صورت نئوماتیکی از مجرا بیرون می روند. در یک دبی متوسط بستر منبسط می شود و ذرات با یک فاصله میانگین آزاد از هم جدا شده و نیروی پسای سیال به آن ها وارد می شود. بستر منبسط شده که دارای خواص سیال گونه است بستر سیال نامیده می شود. ذرات مختلف دارای جرم و اندازه متفاوتی می باشند، ذرات کوچکتر به دلیل وزن کمتر تحت تاثیر نیروی پسای سیال قرار گرفته و معلق می شوند. حداقل سرعتی که نیاز است تا این ذرات از جای خود برخواسته و معلق شوند حداقل سرعت معلق سازی (Fluidization) نامیده می شود. ذرات سنگین تر در بستر باقی مانده و تشکیل فاز متفاوتی را می دهند.

## ۱-۲- احتراق سوخت جامد در بستر سیال

در بررسی احتراق ذرات در بستر سیال باید چند پدیده را در نظر گرفت، ابتدا هنگامی که یک ذره سوختی در داخل یک بستر سیال داغ پاشیده می شود شروع به خشک شدن (Drying) می کند و رطوبت آن بخار می شود، خشک شدن که معمولا چند ثانیه طول می کشد با انقباض ذره همراه است. سپس گرم شدن ذره باعث ایجاد فرآیند فرآرزدایی (Devolatilization) می شود. فرآرزدایی فرآیندی است که در آن کسر مواد فرآر (Volatile) در یک دمای مشخص از ذره جامد جدا می شود. زمان متوسط فرآرزدایی بسته به نوع سوخت، اندازه ذره و دمای بستر، چند ثانیه طول می کشد. کسر فرآر جدا شده از ذره جامد در یک فاز همگن می سوزد. ذغال (Char) باقی مانده از سوخت جامد که به طور عمده از کربن و خاکستر تشکیل شده است شعله ور شده و به صورت ناهمگن با اکسیژن می سوزد. مدت زمان زیادی ممکن است طول بکشد تا ذغال به طور کامل بسوزد. همین مسئله تعیین کننده زمان ماندگاری ذرات سوخت در بستر است.

## ۱-۳- زباله جامد قابل اشتعال

زباله های جامد شهری (خانگی، تجاری، صنعتی و سازمانی) پس از جمع آوری به واحدهای فرآوری زباله برده می شوند. در این واحدها ابتدا قسمت هایی از زباله که قابل بازیافت می باشند (مانند پلاستیک ها) و همچنین قسمت هایی که قابل اشتعال نیستند (مانند فلزات) جدا شده و باقیمانده زباله خرد می شود. زباله جامد خرد شده ای که مواد بازیافتی و مواد غیر قابل اشتعال در آن وجود ندارد، زباله جامد قابل اشتعال (RDF) می نامند و می توان از آن به عنوان سوخت در تولید توان و حرارت استفاده کرد.

## ۲- مروری بر پژوهش های دیگران

در گذشته فرآیند احتراق توسط کدهای اختصاصی و مخصوصا برای همان مسئله نوشته می شد، در حالی که در چند سال اخیر استفاده از کدهای تجاری CFD فراهم است. این کدها عموما برای مدل سازی سوزش ذغال سنگ خورد شده بکار برده شده اند، با این امید که CFD روشی سریع و ارزان برای شناسایی محفظه احتراق و توان کوره است. ایستویک و دیگران [۱] قابلیت دو کد را بررسی کرده اند، Fluent و CFX. نتایج آزمایشگاهی بوسیله یک مشعل هوایی با سوخت ذغال سنگ و توان ۲.۵ MW بدست آمد: مقایسه بین داده های آزمایشگاهی و داده های پیش بینی شده در مورد سرعت، دما و غلظت های اجزا، اختلافات بین دو کد را نشان می دهد. این اختلافات به دلیل تفاوت های موجود در مدل های فیزیکی است که فرآرزدایی و احتراق گازی را توصیف می کنند: این مسئله می تواند به دلیل مدل فرآرزدایی CFX باشد که بر اساس تابع آرنیوس است که با مشاهدات آزمایشگاهی سازگار نیست.

ایتون و دیگران [۲] روش مشابهی را بکار بردند: آنها نتایج برگرفته از PCGC-3 و Fluent را با داده های آزمایشگاهی رآکتور CPR مقایسه کردند. رآکتور CPR استوانه ای شکل با سوخت ذغال سنگ و توان ۰.۵ MW است که دارای قطر داخلی ۰.۸ m و ارتفاع ۲.۴ m است؛ ویژگی ممتاز آن گردابی کردن جریان هوای ثانویه است. اختلافات بین پیش بینی های هر دو کد و مقدارهای اندازه گیری شده به دلیل ناسازگاری مدل اغتشاش است. زیرا جریان به شدت گردابی است و تعیین زمان آغاز اشتعال کار دشواری است. همچنین در همین مرجع ایتون و دیگران قابلیت کدهای PCGC-3 و Fluent را برای مدل سه بعدی یک بویلر با سوخت ذغال سنگ و توان ۸۵ MW بررسی کرده اند. این مورد همانند مورد قبل، پیچیدگی اضافی ناشی از جریان نامتقارن را شامل می شود. تحلیل بر اساس دمای گاز و غلظت اجزا است: مقایسه بین نتایج پیش بینی شده و داده های تجربی نشان می دهد که هر دو کد می توانند بینشی از رفتار داخل کوره بدهند اما هنوز کارهای زیادی خصوصاً در مورد دمای شعاعی گاز در ارتفاع های مختلف رآکتور، باید انجام شود.

تحلیل CFD احتراق ذغال سنگ خورد شده، موضوع کار دیگری است که توسط سنگ و دیگران انجام شده است [۳]. از کد Fluent برای شبیه سازی احتراق مخلوط های ذغال سنگ سیاه استرالیایی در یک کوره آزمایشگاهی با توان ۱۵۰ MW استفاده شده است. در مدل از روش مخلوط دوجزئی استفاده شده است تا بتوان اجزا سوخت را به صورت انفرادی پیگیری کرد. علاوه بر این، روش در نظر گیری مخلوط به عنوان یک جزء را که با خواص میانگین وزنی عمل می کند، بکار بردند و با روش قبلی مقایسه کردند. مقایسه نتایج هر دو روش و همچنین نتایج آزمایشگاهی در اندازه گیری اشتعال، خفگی و صدور  $NO_x$  نشان داد که روش مخلوط دو جزئی در پیش بینی رفتار احتراق توأم مخلوط های ذغال سنگ موفق است.

استاپفورد [۴] کاربرد های کد CFX-4 در کوره های ذغال سنگی را توصیف کرده است. هدف اصلی پیش بینی تولید  $NO_x$  و کاهش کربن دوده برای هشت نوع ذغال سنگ در یک کوره واقعی چند مشعله است. نتایج نشان داد که خطای محاسبه  $NO_x$  حدود ۱۵٪ است در حالی که محاسبه کاهش کربن به دلیل دشواری در پیش بینی دارای خطای حدود ۳۰٪ است، اگرچه معمولاً تلاش ها معقول نشان داده می شوند. این مسئله اساساً به دلیل پیچیدگی اکسایش ذغال است که منجر به تولید  $CO_2$  یا  $CO$  می شود.

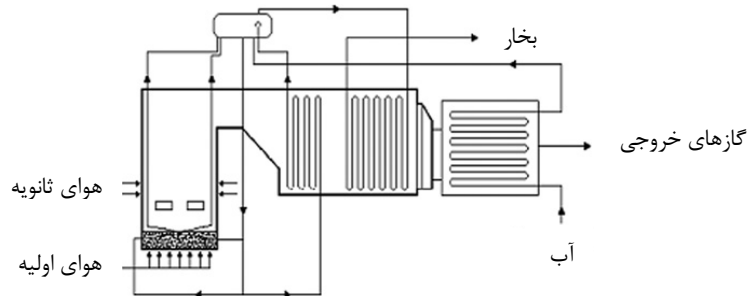
### ۳- توصیف مدل یک بستر سیال محترق

هدف از این مقاله ارزیابی توان یک بویلر از نوع بستر سیال محترق است که قسمتی از یک نیروگاه واقع در کشور ایتالیا است [۵]. این بویلر با سوخت زباله (RDF) کار می کند و سطح مقطع آن مستطیلی است. می توان این بویلر را به دو ناحیه تقسیم کرد: بستر (Bed) و محفظه (Freeboard).

در بستر، سوخت با هوای اولیه می سوزد. هوای اولیه از طریق مجراهای ویژه ای از زیر کوره وارد می شود. این مجراها به گونه ای طراحی شده اند که برای دمای بالا و نواحی با واکنش های زیاد مناسب هستند. به منظور جلوگیری از ریزش ذرات جامد به داخل توزیع کننده هوا، هر مجرا با یک کلاهک پوشیده شده است. سوراخ های روی کلاهک مانند یک اوریفیس عمل کرده و کاهش فشار مناسب برای معلق سازی یکنواخت را فراهم می کنند. پس از اینکه ذرات در بستر گسترده شدند، میسوزند و گرمای مورد نیاز برای ثابت نگه داشتن دمای بستر را فراهم می کنند. عمل سایش ذرات شن لایه ی سوخته شده را از روی ذرات سوخت جدا می کند و احتراق بین سوخت و هوا ادامه می یابد. در طول معلق سازی ارتفاع بستر ۰.۶ m است. پدیده نامطلوب توده شدن (Agglomeration) که در آن ذرات جامد به هم می چسبند، توسط ذرات شن جلوگیری می شود.

در محفظه فرآیند احتراق توسط هوای ثانویه که از مجاری متعددی وارد می شود، کنترل می شود. دو دریچه در بالای بستر قرار گرفته اند که سوخت مورد نیاز از آن ها به داخل بویلر پاشیده می شود. مسیر حرکت ذره (Particle Trajectory) با توجه به شکل و وزن آن متفاوت است، سنگین ترین ذره پس از پاشش به سرعت در داخل بستر می افتد، حال آن که سبکترین ذره همراه جریان گاز از کوره خارج می شود.

لوله های بویلر که به طور کامل در کوره تعبیه شده اند به صورت عمودی و در راستای بلندترین دیواره قرار دارند. این لوله ها در ۴ گروه قرار دارند که هر گروه شامل یازده لوله است. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود این لوله های حاوی آب در نهایت به ظرف بخار (Steam Drum) متصل می شوند. در قسمت پائین بویلر و داخل بستر، لوله ها U شکل هستند و به منظور گردش مناسب جریان آب با شیب  $10^\circ$  به سمت دیواره خم شده اند.



شکل ۱ - نمای شماتیک بستر سیال محترق مربوطه که قسمتی از یک نیروگاه است

در این مقاله تحلیل CFD تنها به قسمت محفظه بویلر محدود می شود، زیرا روش عددی برای تحلیل قسمت بستر کاری دشوار است. پدیده های پیچیده ی موجود در بستر ما را بر آن داشت تا روش حجم کنترل (صفر بعدی) را برای تحلیل آن انتخاب کنیم. این روش با توجه به ابعاد بویلر، فیزیک جریان در بستر و نتایج مورد نظر ما از شبیه سازی، قابل قبول است. معادلات بقای جرم و انرژی برای حجم کنترل حل می شوند و نتایج آن شرایط مرزی قاعده ی قسمت محفظه را تشکیل می دهد. مدل کامل سه بعدی محفظه که توسط Fluent انجام شده است از مدل احتراق دو جزئی (two-mixture-fraction-pdf) برای در نظر گرفتن گازهای ورودی از بستر و ذرات سوخت جامد که در محفظه می سوزند در نظر گرفته شده است [۶]. هوای احتراق از چهار ردیف نازل وارد محفظه می شود، علاوه بر این گرمای مبادله شده بین لوله ها و گاز در نظر گرفته شده است.

#### ۴- معادلات بقای جرم و انرژی در بستر

بویلر مورد نظر از بالای بستر تزریق سوخت می شود. قسمتی از ذرات سوخت در داخل بستر افتاده و قسمتی نیز همراه جریان گاز از بویلر خارج می شوند. ۶۰٪ ذرات در بستر افتاده و در آنجا می سوزند. این مسئله از تفاوت اندازه ذرات پاشیده شده در بویلر ناشی می شود. از قانون استوکس برای پیش بینی نیروی پسا و نیروی وزن ذرات استفاده شده است. فرض شده است که ذرات کروی هستند و از آنجایی که چگالی یکسان دارند عامل تعیین کننده قطر ذره است. ذرات با قطر بزرگتر به داخل بستر افتاده و ذرات با قطر کوچکتر توسط جریان گاز بلند شده و همراه آن از بویلر خارج می شوند. فرض تبدیل کامل سوخت کربن جامد به کربن دی اکسید امکان محاسبه نرخ گاز خروجی از بستر و غلظت اجزای تشکیل دهنده آن را فراهم می سازد. سپس معادله انرژی را برای بستر حل می کنیم. با حل این معادله دمای بستر  $971.2\text{ K}$  به دست می آید. جدول ۱ در حل معادلات بقای جرم و انرژی سودمند است.

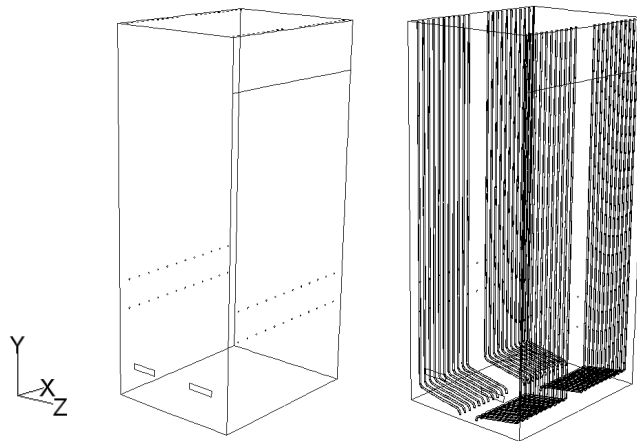
جدول ۱ - نتایج آنالیز اولیه و نهایی برای سوخت جامد مورد نظر

آنالیز اولیه سوخت (%wt)	رطوبت ۸	کربن جامد ۳.۹	مواد فرار ۷۵.۶	خاکستر ۱۲.۵
آنالیز نهایی سوخت (%wt)	کربن ۵۱.۲۴۴	هیدروژن ۴.۲۳۲	نیتروژن ۰.۶۴۴	اکسیژن ۱۶.۳۷۶

## ۵- مدل سازی محفظه

### ۵-۱- هندسه و شبکه بندی

در شکل ۲ هندسه سه بعدی محفظه و متعلقات آن همراه با دستگاه مختصات مرجع نشان داده شده است. قاعده محفظه که گازهای خروجی از بستر از آنجا وارد محفظه می شوند را پایه (Base) می نامیم و ابعاد آن ۴.۵۸ m (در راستای z) در ۵.۹۲۸ m (در راستای x) است. هوای ثانویه از چهار سری نازل وارد بویلر می شود که قطر آن ها ۰.۰۵۱ m است. هر سری شامل ۱۲ نازل است که فاصله آن ها از پایه ۲.۹۶ m و ۳.۹۶ m است. ارتفاع محفظه ۱۲.۹۶ m (در راستای y) است که توسط دو دریچه سوخت مستطیلی با ابعاد ۰.۲ m در ۰.۹ m تغذیه می شود. ابعاد خروجی محفظه ۱.۶ m در ۵.۹۲۸ m است و محصولات احتراق قبل از خروج از آن با ۴۴ لوله تبخیر کننده آب (Evaporative Tubes) انتقال حرارت می کنند. قطر لوله ثابت نیست؛ مقدار آن در قسمت انحنای پایین ۰.۰۷۶ m است و تا ۰.۰۶۴ m در قسمت بالای بویلر کاهش می یابد. این کاهش قطر لوله در راستای دیواره عمودی بویلر با این فکر توسط سازنده ایجاد شده است که انتقال حرارت در محفظه به لوله کمتر شده و در نتیجه گرمای کمتری از بستر خارج شود. در حقیقت فعل و انفعالات داخل بستر تاثیر زیادی بر کنترل دمای معلق سازی دارد؛ حال آنکه انتقال حرارت بین گاز و لوله ها در محفظه تاثیر عمده ای بر فرآیند احتراق ندارد.



شکل ۲ - هندسه سه بعدی محفظه و متعلقات آن همراه با دستگاه مختصات مرجع

یکی از حساس ترین بخش های کار شبکه بندی است. شبکه بندی باید به گونه ای باشد که در تمام نواحی میدان، دقت قابل قبولی را بدهد. از این گذشته محدودیت مدت زمان حل توسط رایانه اجازه شبکه بندی با تعداد سلول بالا را به ما نمی دهد. شبکه بندی شامل ۲۲۲۰۰۰۰ المان است که ۱۲٪ آن المان های منظم می باشد. تعداد گره ها نیز ۶۷۵۰۰۰ است.

### ۵-۲- رویکرد کلی حل

به منظور شبیه سازی یک فرآیند احتراق مدل های بیان شده در این قسمت باید با یک رویه موثر با هم ترکیب شده و حل شوند. در Fluent حل معادلات مربوط به فاز گسسته و مدل تشعشع ترم های چشمه را در معادلات مربوط به فاز پیوسته فراهم می کنند. معادلات بقای جرم، مومنتوم، اغتشاش، انرژی و مخلوط جزئی به صورت پی در پی و تکرار شونده حل می شوند تا زمانی که شرایط همگرایی ارضا شود، یعنی خصوصیات جریان (دما، سرعت، غلظت اجزا و ...) و مقادیر انتگرالی مربوطه (ضریب پسا، ضریب انتقال حرارت و ...) از یک تکرار به تکرار بعدی، تغییر قابل توجهی نکنند. یک حدس اولیه برای شروع حل میدان جریان نیاز است، در اینجا حل مسئله را با محاسبه مقادیر در یک ناحیه مشخص (پایه محفظه) آغاز می کنیم. این ناحیه برای شروع حل مناسب است زیرا گازهای خروجی از بستر از این سطح وارد محفظه می شوند.

### ۵-۳- مدل سازی اغتشاش (Turbulence)

در مدل سازی اغتشاش از مدل  $k-\varepsilon$  تحقق پذیر (Realizable) استفاده شده است [۷]. واژه "تحقق پذیر" به این دلیل انتخاب شده است که مدل قیود ریاضی حاکم بر تنش های رینولدز را که با فیزیک حاکم بر جریان های آشفته سازگار است، ارضا می کند. مدل های  $k-\varepsilon$  استاندارد و  $RNG k-\varepsilon$ ، تحقق پذیر نیستند. از ویژگی های سودمند مدل  $k-\varepsilon$  تحقق پذیر کاربردهای صنعتی گسترده آن است. در این مدل معادلات انتقال  $k$  و  $\varepsilon$  به صورت زیر هستند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (2)$$

### ۵-۴- جریان محترق و انتقال اجزای شیمیایی (Chemical Species Transport)

در این مقاله احتراق سوخت جامد به روش مخلوط دو جزئی مدل سازی شده است. در این روش که اساس مدل سازی در احتراق غیر پیش مخلوط (Non-Premixed Combustion) است سیستم محترق می تواند حداکثر شامل سه جریان باشد: یک "جریان سوخت"، یک "جریان اکسید کننده" و یک "جریان ثانویه".

در سیستم ما ذرات زباله سوخت را تشکیل می دهند، هوای ثانویه اکسید کننده است و جریان گاز خروجی از بستر جریان ثانویه می باشد. در شبیه سازی احتراق ذرات سوخت جامد دقیق تر آن است که کربن جامد موجود در ذره را سوخت و مواد فرار آن را جریان ثانویه در نظر گرفت. اما از آنجایی که باید جریان گاز خروجی از بستر در نظر گرفته شود، از یک جریان برای معرفی ذرات جامد و از جریان دیگر برای معرفی گاز خروجی از بستر استفاده می شود.

به جای حل معادلات انتقال تک تک اجزا، معادلات مربوط به اجزای مخلوط حل می شوند. کسر مولی اجزا و دیگر خواص آبی سیال مانند چگالی و دما از توزیع اجزای مخلوط به دست می آیند. اساس مدل سازی در این روش ارتباطی است که بین خواص آبی ترموشیمیایی سیال و پارامتری اسکالر به نام جزء مخلوط (Mixture Fraction) برقرار می شود. جزء مخلوط را با نماد  $f$  نشان می دهند و مقدار آن در هر نقطه از دامنه جریان با حل معادله ۳ به دست می آید. این معادله بقای میانگین زمانی مقدار  $f$  را در میدان آشفته نشان می دهد. ترم چشمه  $S_m$  مربوط به انتقال جرم از ذرات سوخت در حال اشتعال به فاز گازی است. علاوه بر این معادله، یک معادله بقا برای واریانس جزء مخلوط (Mixture Fraction Variance) نیز حل می شود تا بر هم کنش اغتشاش و احتراق را شامل شود. در روش مخلوط دو جزئی معادلات بقا برای جزء مخلوط و واریانس جزء مخلوط، هم برای  $f_{fuel}$  و هم برای  $f_{sec}$  که جمعا شامل چهار معادله می باشند حل می شوند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_f} \nabla \bar{f} \right) + S_m \quad (3)$$

هنگامی که سیستم محترق غیر آدیاباتیک باشد مقادیر آبی  $\Phi_i$  که خواص اسکالر سیال را بیان می کنند نه تنها به  $f_{fuel}$  و  $f_{sec}$ ، بلکه به آنتالپی کل  $H$  نیز بستگی دارند. در این حالت آنتالپی کل با معادله ۴ حل می شود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{H}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{H}) = \nabla \cdot \left( \frac{k_t}{c_p} \nabla \bar{H} \right) + S_h \quad (4)$$

ترم چشمه  $S_h$  مربوط به تشعشع، انتقال حرارت با دیواره ها و تبادل حرارت با فاز گسسته است. در احتراق غیر پیش مخلوط کسر مولی هر یک از اجزا بر اساس فرض تعادل شیمیایی به دست می آید. در این فرض واکنش های شیمیایی بدون در نظر گرفتن سینتیک واکنش و با سرعت بی نهایت انجام می شوند. فرض تعادل شیمیایی برای

سیستم های با سرعت پایین فرض قابل قبولی است. اجزایی که در مدل شامل شده اند از این قرار هستند:  $H_2O$ ،  $N_2$ ،  $O_2$ ،  $H$ ،  $C$ ،  $N$ ،  $O$ ،  $C(S)$ ،  $H_2O(L)$ ،  $C_3H_8$ ،  $CO$ ،  $H_2$ ،  $CO_2$  های سینتیکی احتراق سوخت آلی جامد که توسط بویکو و دیگران [۸] توسعه یافته، الهام گرفته شده است. تحلیل آن‌ها از فرآیند سوزش سوخت جامد همان فرآیند چند مرحله ای است که قبلاً توضیح داده شد. پس از خشک شدن و گرم شدن ذره تا آزاد سازی مواد فرآر، احتراق مواد فرآر در نزدیکی ذره رخ می دهد و مواد باقیمانده ذره نیز می سوزند.

ترکیب اکسید کننده و جریان ثانویه مشخص است. هوای ثانویه از  $N_2$  (۷۹٪) و  $O_2$  (۲۱٪) تشکیل شده است. گاز خروجی از بستر که از پایه وارد محفظه می شود از  $N_2$ ،  $O_2$ ،  $H_2O$  و  $CO_2$  تشکیل شده است.

تا آنجا که بر هم کنش اغتشاش و احتراق رخ می دهد، مقادیر متوسط زمانی اسکالرها  $\Phi_i$  با استفاده از تابع چگالی احتمال  $p(f)$  محاسبه می شود (معادله ۵). شکل تابع  $p(f)$  توسط تابع  $\beta$  توصیف می شود. به طور کل در این مدل مخلوط دو جزئی غیر آدیاباتیک، مقادیر آبی دما، چگالی و کسر مولی اجزا بر اساس تابعی از جزء مخلوط سوخت، کسر جزئی مخلوط جریان ثانویه و آنتالپی کل آبی محاسبه می شوند. سپس این مقادیر در جداولی سه بعدی ذخیره می شوند.

$$\bar{\Phi}_i = \int_0^1 \int_0^1 \Phi_i(f_{fuel}, p_{sec}, \bar{H}) p_1(f_{fuel}) p_2(p_{sec}) df_{fuel} dp_{sec} \quad (5)$$

### ۵-۵-۵ مدل فاز گسسته

#### ۵-۵-۱- تئوری حرکت ذره

در این تئوری ذرات سوخت که فاز گسسته را تشکیل می دهند، در یک دستگاه مرجع لاگرانژی ردیابی می شوند و مسیر حرکت آن‌ها در سیال که فاز پیوسته را تشکیل می دهد، با بالانس نیروهای وارد بر هر ذره بدست می آید. این بالانس را برای یک ذره در جهت دلخواه  $x$  در مختصات کارتزین می نویسیم:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (6)$$

که  $u$  سرعت فاز سیال،  $u_p$  سرعت ذره،  $\rho$  چگالی سیال و  $\rho_p$  چگالی ذره می باشد. ترم  $F_x$  یک شتاب یا نیروی اضافی است که در شرایط خاصی اهمیت پیدا می کند. نیروی حاصل از گرادیان فشار یا دما، نیروی براونی و نیروی برای ساکن از این قبیل هستند. همچنین  $F_D(u - u_p)$  نیروی پسا در واحد جرم ذره است.

### ۵-۵-۲- رفتار ذرات سوخت

اثر فاز گسسته (مانند ذرات جامد زباله) بر فاز پیوسته (مانند میدان جریان گاز) با تبادل بین فازی مومنتوم، گرما و جرم همراه است. تمام این موارد از زیر مدل هایی ناشی می شوند که فرآیند احتراق را توصیف می کنند. این زیر مدل ها عبارتند از گرمایش، فرآرزدایی و سوزش ذغال.

قانون گرمایش در دو حالت اعمال می شود. هنگامی که ذره سوخت در محفظه احتراق پاشیده می شود و تا زمانی که دمای ذره  $T_p$  کمتر از دمای تبخیر  $T_{vap}$  باشد. همچنین بعد از آن که کسر فرآر  $f_v$  کاملاً مصرف شود. این دو حالت در معادله ۷ نشان داده شده اند.

$$T_p < T_{vap} \quad \cup \quad m_p \leq (1 - f_v) m_{p,0} \quad (7)$$

که  $m_{p,0}$  جرم اولیه ذره سوخت و  $m_p$  جرم ذره در حال حاضر است. دمای تبخیر آغاز فرآیند فرآرزدایی را کنترل می کند.

تحت این شرایط دمای ذره  $T_p(t)$  از یک بالانس ساده که با معادله ۸ بیان می شود به دست می آید.

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p(T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (8)$$

که انتقال حرارت جابه جایی و تشعشع به واسطه جذب یا صدور در سطح ذره در نظر گرفته شده است. در این معادله از مقاومت حرارتی داخل ذره صرف نظر شده است و فرض شده است که تمام ذره در یک دمای یکنواخت قرار دارد.  $T_\infty$  و  $\theta_R$  به ترتیب دمای محلی فاز پیوسته و دمای تابش هستند.  $\theta_R$  با رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\theta_R = \left( \frac{G}{4\sigma} \right)^{1/4} \quad (9)$$

قانون فرآوردایی هنگامی اعمال می شود که دمای ذره سوخت به دمای تبخیر برسد و تا زمانی این قانون ادامه می یابد که جرم ذره  $m_p$  به جرم بدون مواد فرآورد برسد. معادله ۱۰ بیانگر این قانون است.

$$T_p \geq T_{vap} \quad \& \quad m_p > (1 - f_v)m_{p,0} \quad (10)$$

به منظور مدل سازی فرآوردایی، از مدل دو نرخ رقابتی (مدل کوبایاشی) استفاده شده است:

$$\frac{m_v(t)}{m_{p,0} - m_a} = \int_0^t (\alpha_1 R_1 + \alpha_2 R_2) \exp\left(-\int_0^t (R_1 + R_2) dt\right) dt \quad (11)$$

که  $R_1$  و  $R_2$  نرخ های سینتیکی فرآوردایی بر اساس واکنش دو مرحله ای آرنیوسی می باشند. انتقال حرارت به ذره شامل ترکیب جابجایی، تشعشع و مقدار گرمایی است که در طول فرآوردایی مصرف می شود، و این موارد در معادله ۱۲ آمده است.

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p(T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (12)$$

پس از فرآوردایی، هنگامی که معادله ۱۳ ارضا شود، احتراق کربن جامد C(S) آغاز شده و تا زمانی که کسر ذغال  $f_c$  مصرف شود ادامه می یابد.

$$m_p < (1 - f_v)m_{p,0} \quad \& \quad m_p > (1 - f_v - f_c)m_{p,0} \quad (13)$$

پس از مصرف کامل ذغال، فقط خاکستر است که در ذره باقی می ماند و قانون گرمایش که قبلاً بیان شد شامل حال آن می شود.

کد Fluent چهار مدل متفاوت را برای شبیه سازی واکنش سطحی ناهمگن ارائه می دهد. ما مدل نرخ نفوذ - سینتیک محدود را برای احتراق سطحی ذغال انتخاب کردیم. در این مدل فرض می شود که نرخ واکنش سطحی به صورت سینتیکی یا نفوذی تعیین می شود. نرخ نفوذی را با  $D_0$  و نرخ سینتیکی را با  $\mathfrak{R}$  نشان می دهیم. این دو نرخ به صورت زیر با هم ترکیب شده تا نرخ سوزش ذغال را بیان کنند:

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p p_{ox} \frac{D_0 \mathfrak{R}}{D_0 + \mathfrak{R}} \quad (14)$$

که  $A_p$  سطح ذره،  $p_{ox}$  فشار جزئی اجزای اکسید کننده در گاز مجاور ذره محترق است. واکنش سطحی اجزای اکسید کننده در فاز گازی را مصرف می کند و یک ترم منفی در محاسبه معادله انتقال اجزای اکسید کننده ایجاد می کند. به طور مشابه واکنش سطحی با تولید محصولات، یک ترم مثبت در معادلات مربوط به فاز گازی ایجاد می کند. همچنین واکنش سطحی انرژی را مصرف یا تولید می کند. این مقدار انرژی بستگی به گرمای واکنشی دارد که توسط ما تعیین می شود. بالانس حرارتی ذره در طول واکنش سطحی با معادله ۱۵ بیان می شود.

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p(T_\infty - T_p) - f_h \frac{dm_p}{dt} H_{reac} + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (15)$$



که  $H_{\text{reac}}$  گرمای آزاد شده در واکنش سطحی است. تنها قسمت  $(1-f_h)$  از انرژی تولید شده به عنوان چشمه گرمایی در معادله انرژی فاز گازی وارد می شود. ذره کسر  $f_h$  از این انرژی تولید شده را جذب می کند.

### ۵-۶- معادله انتقال تشعشع

در فرآیندهای احتراق، تشعشع روش انتقال انرژی غالب است. در یک کوره که با ذرات سوخت جامد تغذیه می شود تشعشع هم شامل ذرات (ذغال، خاکستر و دوده) و هم شامل گاز (غالباً  $\text{H}_2\text{O}$  و  $\text{CO}_2$ ) است. بنابراین مدل انتقال حرارت تشعشع باید معادلات بقای انرژی تابشی و ترم های مربوط به خواص تابشی گازها و ذرات موجود را در برگیرد. باید توجه شود که شدت تابش نه تنها تابعی از مکان بلکه تابع جهت هم می باشد و بنابراین گسسته سازی علاوه بر فضا باید در جهت انتشار تشعشع نیز باشد. همین مساله باعث تفاوت در مدل های انتقال تشعشع می شود. ما از مدل قدرتمند و کامل DO در مدل سازی تشعشع استفاده کرده ایم [۹]. این مدل معادله انتقال تشعشع را به صورت یک معادله میدانی در جهت  $\vec{s}$  در نظر می گیرد. هنگامی که ذرات جامد در شبیه سازی موجود باشند این معادله به صورت زیر است:

$$\nabla \cdot (I\vec{s}) + (a + a_p + \sigma_p)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + E_p + \frac{\sigma_p}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (16)$$

که  $a_p$  ضریب جذب معادل به واسطه حضور ذرات است که با معادله ۱۶ بیان می شود. ضریب صدور معادل  $E_p$  و ضریب پراکندگی معادل ذرات  $\sigma_p$  به ترتیب با معادلات ۱۸ و ۱۹ بیان می شوند.

$$a_p = \lim_{V \rightarrow 0} \sum_{n=1}^N \varepsilon_{pn} \frac{A_{pn}}{V} \quad (17)$$

$$E_p = \lim_{V \rightarrow 0} \sum_{n=1}^N \varepsilon_{pn} A_{pn} \frac{\sigma T_{pn}^4}{\pi V} \quad (18)$$

$$\sigma_p = \lim_{V \rightarrow 0} \sum_{n=1}^N (1 - f_{pn}) (1 - \varepsilon_{pn}) \frac{A_{pn}}{V} \quad (19)$$

که  $\varepsilon_{pn}$ ،  $A_{pn}$  و  $T_{pn}$  به ترتیب ضریب جذب، مساحت تصویر شده و دمای ذره  $n$ -ام است. جمع  $N$  ذرات روی حجم  $V$  می باشد. این مقادیر در حین ردیابی ذره (Particle Tracking) محاسبه می شوند.

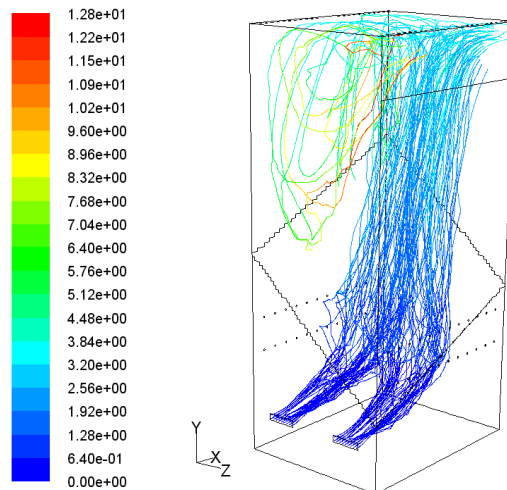
### ۶- مقایسه نتایج

در جدول ۲ نتایج حاصل از تحلیل CFD و داده های تجربی (اندازه گیری شده در بویلر نیروگاه مربوطه) موجود است.

جدول ۲ - مقایسه بین داده های تجربی و نتایج حاصل از شبیه سازی

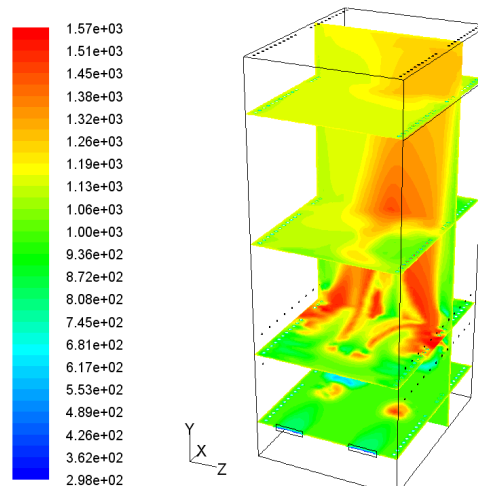
مقادیر	داده های تجربی	نتایج شبیه سازی	خطا %
دمای گاز در خروجی بویلر (K)	۱۱۹۴.۲	۱۱۶۰.۵	-۲.۸
دمای گاز در صفحه $y=3.96\text{m}$ (K)	۱۰۹۹.۴	۱۱۰۲.۳	+۰.۳
گرمای جذب شده توسط لوله های بویلر (kW)	۶۴۷۲	۵۹۴۷	-۸.۱
کسر مولی اجزای شیمیایی در خروجی بویلر			
$\text{CO}_2$	۰.۰۹۶	۰.۰۹۶	۰.۰
$\text{H}_2\text{O}$	۰.۰۷۷	۰.۰۷۰	-۹.۱
$\text{O}_2$	۰.۰۸۷	۰.۰۸۹	+۲.۳
$\text{N}_2$	۰.۷۳۹	۰.۷۴۵	+۰.۸

تاریخچه هر یک از ذرات زباله هم از لحاظ کیفی و هم از لحاظ مقداری قابل ردیابی است. مسیر حرکت تعدادی از ذرات بر اساس زمان ماندگاری (Residence Time) آن‌ها (بر حسب ثانیه) در محفظه در شکل ۳ نشان داده شده است. زمان ماندگاری معرف مدت زمانی است که یک ذره از لحظه پاشش به داخل محفظه تا لحظه خروج از آن طی می‌کند. هر منحنی رنگی نشان دهنده مسیر حرکت ذره متناظر می‌باشد که رنگ آن با افزایش زمان ماندگاری تغییر می‌کند. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود تعداد اندکی از ذرات در بالای محفظه دچار سردرگمی می‌شوند و زمان ماندگاری بیشتری دارند.

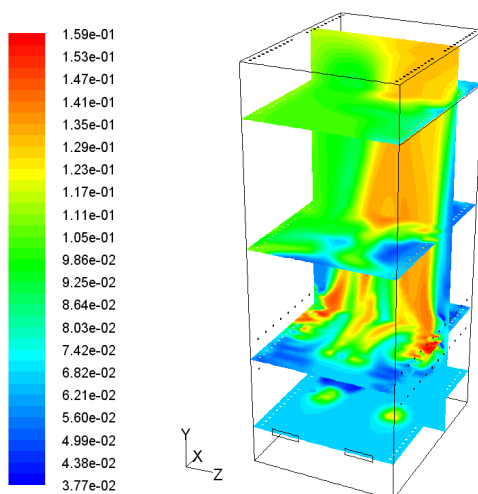


شکل ۳ - مسیر حرکت تعدادی از ذرات که بر اساس زمان ماندگاری (s) آن‌ها رسم شده است

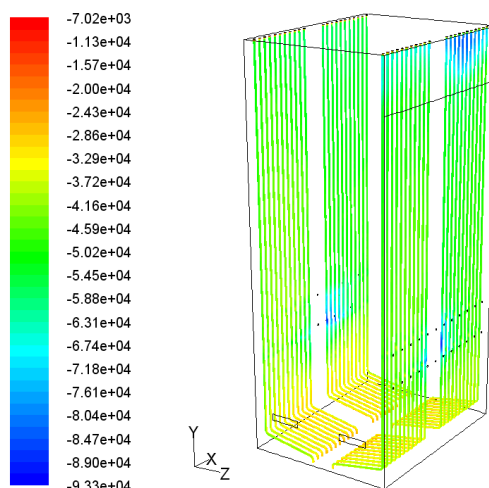
به منظور بررسی دقیق‌تر فرآیند احتراق دو نمونه از نتایج خروجی را مشاهده می‌کنیم. شکل ۴ کانتورهای تغییرات دما را در چند صفحه منتخب نشان می‌دهد. شکل ۵ کانتورهای تغییرات کسر مولی  $CO_2$  را در همان صفحات نشان می‌دهد. هر دو شکل رفتار مشابهی را در محفظه نشان می‌دهند که تحت تاثیر جریان حرکت ذرات سوخت می‌باشند. یکی از خروجی‌های مهم در این شبیه‌سازی شار حرارتی است که به لوله‌های بویلر وارد می‌شود. انتقال حرارت محصولات احتراق با لوله‌های بویلر غالباً با مکانیزم تشعشع است و تنها  $670 \text{ kW}$  از  $5947 \text{ kW}$  سهم انتقال حرارت با مکانیزم جابجایی است. می‌توان شار حرارتی وارد به لوله‌ها را در شکل ۶ مشاهده کرد.



شکل ۴ - کانتورهای دما (K)



شکل ۵ - کانتورهای کسر مولی  $CO_2$



شکل ۶ - کانتورهای شار حرارتی ( $w/m^2$ ) وارد بر لوله های بویلر

## ۷- نتیجه گیری

بستر سیال محترق دارای ویژگی های مثبتی است که به بعضی از آن ها اشاره می کنیم:

- پایین بودن حداکثر دمای احتراق (در این مقاله در حدود  $1700\text{ K}$ ) که فواید زیادی دارد. بسیاری از رادیکال های آلاینده در دماهای بالا تولید می شوند و پایین بودن دمای احتراق اجازه تولید این رادیکال ها را نمی دهد. همچنین پایین بودن دما در استهلاک کمتر تجهیزات نیروگاه موثر است.
- بازده احتراق به دلیل معلق شدن ذرات، زمان کافی ماندگاری آن ها در محفظه و دمای مناسب بستر، بالا می باشد.
- کنترل آلودگی در این سیستم کار نسبتاً آسانی است. غالب آلاینده ها شامل ذرات خاکستر خروجی است که با روش های حذف ذرات جامد از جریان جدا می شوند.

در این مقاله رفتار یک بستر سیال محترق با سوخت زباله (RDF) به وسیله مدل سازی CFD به منظور درک بیشتر از فرآیندهای احتراق و انتقال حرارت با موفقیت شبیه سازی شد. بسیاری از نتایج سودمند دیگر در این شبیه سازی به دست آمد که به دلیل حجم کم مقاله از بیان آن ها صرف نظر شد.

## مراجع

- 1- Eastwick CN, Pickering SJ, Aroussi A., "Comparisons of two commercial computational fluid dynamics codes in modelling pulverised coal combustion for a 2.5MW burner", Appl Math Model 1999; 23:437-46.
- 2- Eaton AM, Smoot LD, Hill SC, Eatough CN. "Components, formulations, solutions, evaluation and application of comprehensive combustion models", Prog Energy Combust Sci 1999; 25:387-436.
- 3- Sheng C, Moghtaderi B, Gupta R, Wall TF. "A computational fluid dynamics based study of the combustion characteristics of coal blends in pulverised coal-fired furnace", Fuel 2004; 83:1543-52.
- 4- Stopford PJ. "Recent applications of CFD modelling in the power generation and combustion industries", Appl Math Model 2002; 26: 351-74.
- 5- Ravelli S, Perdichizzi A, Barigozzi G. Description, "Applications and numerical modelling of bubbling fluidized bed combustion in waste-to-energy plants", Progress in Energy and Combustion Science 34 (2008) 224-253.
- 6- FLUENT 6.3 User's Guide, 2006.
- 7- T. H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, and J. Zhu. "A New  $k-\varepsilon$  Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation. Computers Fluids", 24(3):227-238, 1995.
- 8- Boiko EA, Pachkovskii SV. "A kinetic model of thermochemical transformation of solid organic fuels", Russian J Appl Chem 2004; 77: 1547-55.
- 9- G. D. Raithby and E. H. Chui. "A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media", J. Heat Transfer, 112:415-423, 1990.