

بررسی تاثیر قطر و رطوبت ذرات در احتراق سوخت مشتق شده از زباله‌ها (RDF)

با استفاده از نرم افزار فلوئنت، احتراق سوخت مشتق شده از زباله در یک کوره شبیه‌سازی و نتایج حاصل با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده است. به دلیل دو فازی بودن جریان از مدل اویلری برای شبیه‌سازی میدان سیال و از مدل لاگرانژی برای دنبال کردن ذرات سوخت مشتق شده از زباله استفاده شده است. برای مدل‌سازی فرآیند آزاد شدن گازهای فرار و احتراق مواد نیم سوز به ترتیب از مدل سینتیک تک نرخی و مدل نفوذ-سینتیک استفاده شد. برای شبیه‌سازی جریان سیال از معادلات متوسط‌گیری شده نویر-استوکس و برای مدل‌سازی تنش رینولدز از مدل $k-\epsilon$ استاندارد استفاده شده است. قطر و رطوبت ذرات یکی از پارامترهای مهم در احتراق سوخت های می‌باشد. با بررسی قطرهای مختلف مشاهده شد که با افزایش قطر ذرات سوخت مشتق شده از زباله بیشینه دما کاهش یافته و ناحیه دما بالا از ورودی فاصله می‌گیرد. همچنین با افزایش رطوبت ذرات مشاهده شد که ماکزیمم دما در کوره کاهش می‌یابد.

امین کاردگر^۱

دانشجوی کارشناسی ارشد

کیومرث مظاهری بادی^۲

استاد

واژه‌های راهنما: ذرات سوخت مشتق شده از زباله، اویلری-لاگرانژی، مدل سینتیک تک نرخی، مدل نفوذ-سینیک، قطر ذرات

۱- مقدمه

ضرورت توجه به مسائل زیست محیطی ناشی از پسماندهای خانگی، صنعتی و شیمیایی بر هیچ کس پوشیده نیست. این ضرورت از آنجا ناشی می‌شود که رابطه متعارف میان انسان و محیط زیست به دلیل زیاده روی انسان به تندی در حال خارج شدن از شکل اعتدال و توازن است. یکی از روش‌های کاهش آسیب‌رسانی به محیط زیست استفاده از زباله‌ها به عنوان سوخت در کوره‌ها می‌باشد. با این روش می‌توان از ارزش حرارتی زباله‌ها استفاده کرد و همچنین از حجم زباله‌هایی که ممکن است به محیط زیست از طریق دفن آنها آسیب برسد، کاست. در این روش در طی فرآیندهایی مواد غیر قابل احتراق مانند ماسه و سنگ و مواد خطرناک مانند فلزات آهنی و شیشه از زباله‌ها جدا شده و بعد به صورت پودر در می‌آیند. از زباله‌های پودر شده می‌توان به صورت سوخت جامد در کوره‌ها استفاده کرد. امروزه از این سوخت در صنایع مختلف به خصوص صنایع سیمان استفاده می‌شود. در حقیقت هیچ تعریف یکسانی از

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

^۲ نویسنده مسئول، استاد، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس kiumars@modares.ac.ir

سوخت مشتق شده از زباله^۱ وجود ندارد و در کشورهای مختلف تعاریف متفاوتی از آن ارائه می‌شود. ولی به طور کلی سوخت‌های مشتق شده از زباله‌ها شامل محدوده وسیعی از مواد جامد هستند که بر روی آنها فرآیندی انجام پذیرفته تا ارزش حرارتی بالایی پیدا کنند.

تاکنون کارهای مختلفی در زمینه احتراق سوخت‌های جامد مانند زیست‌توده و زغال‌سنگ انجام شده است. لیاکوس^۲ و همکارانش در سال (۱۹۹۸) با شبیه‌سازی احتراق ذرات زغال سنگ نشان دادند که با افزایش قطر ذرات زغال سنگ، دما در تمام نواحی کوره کاهش می‌یابد [۱]. در سال (۲۰۰۹) مقایسه‌ای بین سوخت زغال سنگ و سوخت مشتق شده از زباله به صورت آزمایشگاهی توسط وبر و همکارانش صورت گرفت و مشاهده شد که زمان لازم برای احتراق کامل ذره زغال سنگ $\frac{1}{3}$ ثانیه می‌باشد، در صورتی که این زمان برای ذره سوخت مشتق شده از زباله $\frac{1}{8}$ ثانیه است. دلیل این امر به تفاوت درصد مواد فرار و اندازه قطر ذرات زغال سنگ و سوخت مشتق شده از زباله نسبت داده شد [۲]. ایشان برای این کار از دو دسته سوخت مشتق شده از زباله با قطر کمتر از 0.5 mm و 1 mm استفاده کردند. پالاراس^۳ و همکارانش در سال (۲۰۰۹) با شبیه‌سازی عددی احتراق همزمان زغال سنگ و ساینارا کاردانکولوس^۴ (نوعی گیاه) بیان کردند که قطر ذرات ساینارا کاردانکولوس پارامتر مهمی در احتراق این ذرات است. ایشان بیان کردند که با افزایش قطر ذرات، نرخ احتراق مواد نیم سوز کاهش می‌یابد [۳].

در سال (۲۰۱۰) یین^۵ و همکارانش احتراق همزمان کاه و زغال سنگ را به صورت عددی بررسی کردند. ایشان برای مدل‌سازی تشعشع محیط را فعال در نظر گرفتند و از تاثیر پراکندگی سیال در برابر ذرات صرف کرده و از مدل جهت‌های مجزا^۶ استفاده کردند. ایشان بیان کردند که تاثیر گرادیان دمای درون ذرات سوخت زغال سنگ و کاه با قطر کمتر از 1 mm در احتراق قابل صرف نظر کردن است [۴].

آگرانیوتیس^۷ و همکارانش در سال (۲۰۱۰) احتراق هم زمان زغال سنگ و سوخت جامد بهبود یافته^۸ را شبیه‌سازی کردند. ایشان بیان داشتند که درصد احتراق ذرات نسوخته با افزایش قطر ذرات افزایش می‌یابد. آنها علت این امر را کافی نبودن زمان ماند برای احتراق ذرات با قطر بزرگتر عنوان کردند [۵].

در سال (۲۰۱۰) لو^۹ و همکارانش با شبیه‌سازی احتراق ذرات زیست‌توده تاثیر شکل ذرات را در احتراق این نوع سوخت‌ها بررسی کردند. آنها با بررسی شکل‌های استوانه، دیسک و کره نشان دادند که نرخ آزاد شدن گازهای فرار برای شکل دیسک بیشتر از استوانه و برای استوانه بیشتر از کره است. علت این امر کمتر بودن نسبت سطح به حجم ذرات کروی و استوانه‌ای نسبت به دیسک و در نتیجه کاهش نرخ انتقال حرارت به ذرات کروی و استوانه‌ای نسبت به دیسک است [۶].

¹ Refused Derived Fuel

² Liakos

³ Pallares

⁴ Cynara Cardunculus

⁵ Yin

⁶ Discrete Ordinate

⁷ Agraniotis

⁸ Solid Recovered Fuel

⁹ Lu

گوبا^۱ و همکارانش در سال (۲۰۱۱) با شبیه‌سازی احتراق هم زمان ذرات زیست‌توده و زغال سنگ نشان دادند که با افزایش رطوبت ذره دمایی ذره کاهش می‌یابد. دمایی ذره پارامتر مهمی در نرخ آزاد شدن گازهای فرار است [۷].

همانطوری که در کارهای قبلی مشاهده شده است، یکی از پارامترهای مهم در احتراق ذرات سوخت مشتق شده از زباله و سوخت‌های شبیه به آن مانند انواع زیست‌توده‌ها، قطر ذرات می‌باشد. قطر ذرات نقشی تعیین کننده در احتراق این نوع سوخت‌ها دارد. قطر ذرات تعیین کننده زمان مورد نیاز برای احتراق سوخت مشتق شده از زباله می‌باشد.

۲- معادلات حاکم و مدل‌های مورد استفاده برای احتراق سوخت مشتق شده از زباله

در احتراق سوخت جامد پودر شده مانند سوخت زغال سنگ و سوخت مشتق شده از زباله، ارتباط بین ذرات جامد و سیال بسیار مهم است. در این جریان‌ها سیال با ذره تبادل ممنتوم، انرژی و جرم دارد. زمانی که ذره در یک سلول محاسباتی قرار دارد، مانند یک منبع ممنتوم، انرژی و جرم برای سیال رفتار می‌کند. در نتیجه مسیر ذرات تعیین کننده غلظت گونه‌ها، ممنتوم و در نهایت رفتار شعله است [۸]. در این نوع جریان‌ها برای شبیه‌سازی جریان سیال از دیگه اویلری و برای شبیه‌سازی حرکت ذرات سوخت مشتق شده از زباله از دیدگاه لاگرانژی استفاده می‌شود.

۲-۱- معادلات حاکم بر جریان سیال

برای شبیه‌سازی احتراق سوخت مشتق شده از زباله مانند دیگر پدیده‌های جریان سیالات، از معادلات حاکم بر فیزیک جریان سیال استفاده می‌گردد، که عبارتند از:

۱. بقای جرم
۲. بقای ممنتوم
۳. بقای انرژی
۴. بقای گونه‌ها

از این معادلات در روش مدل سازی RANS، نسبت به زمان متوسط‌گیری می‌شود. برای مدل‌سازی تنش رینولدز از مدل $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده می‌شود. مدل $k-\varepsilon$ به دلیل سادگی و هزینه مناسب نسبت به مدل‌های دیگر، محبوبیت زیادی دارد. در این مدل می‌توان دو مقیاس زمانی انتگرالی k/ε و مقیاس کولموگوروف $\sqrt{\varepsilon}/\nu$ که در احتراق کاربرد فراوان دارند، را به دست آورد. در مدل احتراقی آشفته مانند مدل مدل اضمحلال ادی^۲ از مقیاس انتگرالی k/ε استفاده می‌شود [۹].

معادله انتقال حرارت تشعشع برای بررسی رفتار تشعشعی محیط‌های فعال تشعشعی استفاده می‌شود. در محیط ذره‌ای^۳ از پراکندگی شدت تشعشع توسط محیط در مقابل پراکندگی تشعشع توسط ذرات صرف نظر

¹ Gubba

² Eddy Dissipation Model

³ Eddy Dissipation Model

می‌شود [۱۰]. در تحقیق حاضر از روش جهت‌های مجزا^۱ برای حل معادله انتقال حرارت تشعشی استفاده شده است. این روش تقریب به نسبت دقیقی از حل کامل معادله انتقال حرارت تشعشی به دست می‌دهد که به دلیل دقت و سرعت محاسبات در مسائل احتراقی کاربرد گسترده‌ای یافته است. همچنین از پراکندگی تشعشع توسط ذرات صرف نظر می‌شود.

به طور کلی در شعله غیرپیش آمیخته در جریان‌های آشفته سوخت و اکسیژن در ادی‌های جداگانه‌ای وجود دارند. از آنجایی که واکنش شیمیایی در بیشتر مواقع خیلی سریع اتفاق می‌افتد، می‌توان فرض کرد که نرخ احتراق با توجه به نرخ اختلاط ادی‌های سوخت و اکسیژن در مقیاس مولکولی، به عبارت دیگر با نرخ اضمحلال این ادی‌ها تعیین می‌شود. بر این اساس مگنسن و ژرتاژر^۳ در سال (۱۹۷۷) مدل اضمحلال ادی را ارائه دادند. بر اساس این مدل نرخ واکنش سوخت برای واکنش ساده زیر برابر است با [۱۱]:

$$\text{محصولات } (1 + r_f) \text{ kg} \rightarrow \text{اکسیژن } r_f \text{ kg} + \text{سوخت } 1 \text{ kg} \quad (۱)$$

$$\dot{\omega}_f = A \bar{C}_f \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) \quad (۲)$$

در رابطه بالا A یک ثابت بوده و به ساختار شعله و نرخ واکنش سوخت و اکسیژن بستگی دارد و برابر ۴ پیشنهاد شده است [۱۱]. \bar{C}_f متوسط زمانی غلظت محلی سوخت و ε نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی و k انرژی جنبشی آشفتگی است.

در نواحی‌ای از شعله که غلظت سوخت زیاد بوده و غلظت اکسیژن کم است، نرخ اضمحلال اکسیژن کنترل کننده واکنش خواهد بود و نرخ احتراق به صورت زیر بیان می‌شود [۱۱]:

$$\dot{\omega}_f = A \bar{C}_{O_2} / r_f \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) \quad (۳)$$

که در رابطه بالا \bar{C}_{O_2} غلظت متوسط محلی اکسیژن و r_f ضریب استوکیومتری اکسیژن برای سوختن ۱ کیلوگرم سوخت است.

در شعله‌های پیش آمیخته سوخت و اکسیژن در یک ادی قرار می‌گیرند. این ادی‌ها به وسیله ادی محصولات احتراق از هم جدا می‌شوند. در این شعله‌ها نیز نرخ احتراق با مکانیزم بالا بیان می‌شود. با این تفاوت که یک معادله برای زمانی که غلظت محصولات داغ احتراق پایین باشد، باید اضافه شود. این معادله به صورت زیر بیان می‌شود [۱۱]:

$$\dot{\omega}_f = AB \bar{C}_p / (1 + r_f) \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) \quad (۴)$$

در رابطه بالا B یک ثابت و برابر ۰/۵ است. \bar{C}_p متوسط زمانی غلظت محلی محصولات احتراق است. سه معادله بالا را هم برای احتراق پیش آمیخته و هم برای احتراق غیرپیش آمیخته می‌توان به کار برد. معادله‌ای که پایین‌ترین نرخ واکنش را دارد، تعیین کننده نرخ احتراق خواهد بود.

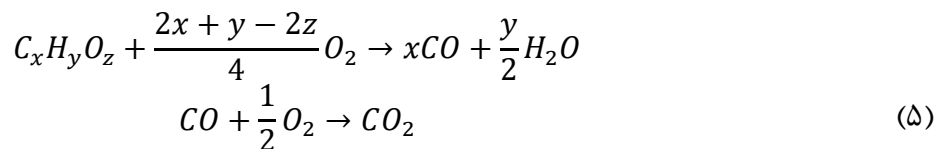
مواد فرار ترکیبی از گازهای هیدروکربنی مانند CH_4 ، C_3H_8 و گازهای دیگر مانند CO_2 و CO می‌باشند. برای شبیه‌سازی احتراق گازهای فرار باید درصد جرمی هر یک از این گازها در مواد فرار مشخص باشد. روشی دیگری که برای مدل‌سازی احتراق گازهای فرار استفاده می‌شود، در نظر گرفتن گازهای فرار به صورت

^۱ Discrete Ordinate

^۲ Eddy

^۳ Magnusson and Hjertajer

یک ترکیب $C_xH_yO_z$ است که ضرایب x ، y و z با استفاده از آنالیز نهایی و تقریبی به دست می‌آید. آنالیز تقریبی تعیین کننده درصد وزنی گازهای فرار، خاکستر، رطوبت و کربن ثابت است. آنالیز نهایی تعیین کننده درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده مانند کربن، سولفور، نیتروژن و اکسیژن است. برای شبیه‌سازی احتراق گازهای فرار سوخت مشتق شده از زباله از واکنش دو مرحله‌ای زیر استفاده می‌شود [۴].



از آنجا که در واکنش مورد نظر از یک گونه مصنوعی استفاده می‌شود، سینتیکی برای آن بیان نشده است. از طرفی در این نوع جریان‌ها به دلیل بالا بودن عدد دامکولر^۱ $Da \gg 1$ از فرض شیمی سریع استفاده می‌شود [۳].

۲-۲- معادلات حاکم بر ذرات سوخت مشتق شده از زباله

برای مدل‌سازی حرکت، انتقال حرارت و انتقال جرم برای ذرات از دیدگاه لاگرانژی استفاده می‌شود. معادلات اصلی حرکت و انتقال حرارت برای ذره به صورت معادلات دیفرانسیل معمولی است. برای دنبال کردن مسیر ذرات از قانون دوم نیوتن استفاده می‌شود. طبق این قانون شتاب ذره با استفاده از نیروهای وارد بر آن بدست می‌آید.

مکانیزم انتقال حرارت، انتقال جرم و احتراق برای ذرات سوخت مشتق شده از زباله دارای چند مرحله است، که عبارت است از [۴]:

۱. افزایش دمای ذره
۲. تبخیر رطوبت
۳. جوشش رطوبت
۴. آزاد شدن گازهای فرار
۵. احتراق مواد فرار
۶. احتراق مواد نیم سوز

در صورت وجود رطوبت در ذرات سوخت مشتق شده از زباله، ابتدا رطوبت ذره تبخیر شده و ذره خشک می‌شود. زمانی که ذره وارد کوره می‌شود، دمای آن بالا رفته و به دلیل اختلاف غلظت بخار آب بر روی سطح ذره و محیط پیرامون، تبخیر سطحی^۲ اتفاق می‌افتد. زمانی که دمای ذره به نقطه جوش آب می‌رسد، دمای ذره ثابت باقی مانده تا تمام رطوبت تبخیر شود. بعد از تبخیر شدن رطوبت ذره، دمای ذره بالا رفته تا به

¹ Damkohler

² Evaporation

دمای شروع آزاد شدن گازهای فرار^۱ برسد. گازهای فرار ترکیبی از گازهای CO ، CO_2 ، CH_4 ، C_3H_8 ، H_2 و گازهای غیر اورگانیک^۲ دیگر می‌باشند [۴].

با بالا رفتن دمای ذرات، گازهای فرار آزاد شده و مواد نیم سوز^۳ برجای می‌مانند. به ذراتی که بعد از آزاد شدن گازهای فرار برجای می‌مانند، در اصطلاح مواد نیم سوز اطلاق می‌شود. مواد نیم سوز ترکیبی از کربن و خاکستر^۴ است. کربن موجود در مواد نیم سوز با اکسیژن واکنش داده و تبدیل به گازهای CO و CO_2 می‌شود [۱۲]. بعد از مصرف شدن کربن در اثر واکنش با اکسیژن، خاکستر باقی می‌ماند. خاکستر به عنوان یک ذره خنثی با سیال تبادل انرژی و ممنتوم دارد.

۲-۲-۱- افزایش دمای ذره

در صورتی که فرآیندهای تبخیر رطوبت و آزاد شدن گازهای فرار در سطح ذره رخ ندهند، ذره به صورت خنثی در نظر گرفته شده که فقط با مکانیزم‌های تشعشع و جابجایی با محیط پیرامونش تبادل حرارت می‌کند. با ورود ذرات به کوره به دلیل بیشتر بودن دمای سیال نسبت به ذرات، دمای ذرات افزایش یافته که برای محاسبه دمای ذرات از معادله زیر استفاده می‌شود [۴].

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma \left(\frac{G}{4\sigma} - T_p^4 \right) \quad (۶)$$

$$G = \int_0^{4\pi} G d\Omega \quad (۷)$$

در معادله (۶) دمای ذره، T_∞ دمای جریان سیال محلی، m_p جرم ذره، h ضریب انتقال حرارت جابجایی، A_p مساحت سطح ذره، ε_p ضریب صدور ذره، σ ثابت استفان-بولتزمن و G شدت تشعشع ورودی به ذرات است. معادله زمانی بر روی ذره اعمال می‌شود که دمای ذره کمتر از دمای تبخیر باشد یا گازهای فرار ذره آزاد شده باشند. این شرطها در روابط (۸) بیان شده است:

$$T_p < T_{vap}, \quad m_p \leq (1 - f_{v,0}) m_{p,0} \quad (۸)$$

در اینجا $m_{p,0}$ جرم اولیه ذره و $f_{v,0}$ کسر مواد فرار ذره است. ضریب انتقال حرارت جابجایی بر روی کره از رابطه‌ای که رانز-مارشال^۵ در سال (۱۹۵۲) ارائه دادند، به دست می‌آید [۱۴].

$$Nu = \frac{hd_p}{k_\infty} = 2 + 0.6Re^{1/2}Pr^{1/3} \quad (۱-۹)$$

$$Re = \frac{\rho d_p |u - u_p|}{\mu}, \quad Pr = \frac{c_p \mu}{k_\infty} \quad (۲-۹)$$

¹ Volatile

² Nonorganic

³ Char

⁴ Ash

⁵ Ranz-Marshall

در روابط بالا k_{∞} ضریب هدایت سیال، d_p قطر ذرات، h ضریب جابجایی حرارت، ρ چگالی سیال، u سرعت سیال، u_p سرعت ذرات، μ لزجت سیال و c_p ظرفیت حرارت سیال می باشد.

۲-۲-۲- تبخیر رطوبت ذره

به طور کلی مولکول‌های آب موجود در سطح ذره به دلیل نداشتن انرژی کافی قادر به غلبه بر نیروی بین مولکولی آب و فرار از سطح ذره نیستند ولی این مولکول‌ها با یکدیگر برخورد کرده و بخشی از انرژی خود را به یکدیگر منتقل می‌کنند. در این حین ممکن است بعضی از مولکول‌های انرژی کافی را به دست آورده و بر نیروی بین مولکولی آب غلبه کرده و از سطح ذره جدا شده و تبخیر شود. برای محاسبه دمای ذرات حین تبخیر از معادله (۱۰) استفاده می‌شود. این معادله زمانی اعمال می‌شود که دمای ذرات کمتر از دمای جوشش ذره باشد [۱۳].

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_{\infty} - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma \left(\frac{G}{4\sigma} - T_p^4 \right) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} \quad (10)$$

که در رابطه بالا T_p دمای ذره و $\frac{dm_p}{dt}$ نرخ تبخیر و h_{fg} نیز دمای نهان تبخیر است. برای محاسبه نرخ تبخیر از رابطه (۱۱) استفاده می‌شود.

$$\frac{dm_p}{dt} = A_p M_{w,i} N_i, \quad N_i = k_c (C_{i,s} - C_{i,\infty}) \quad (11)$$

برای محاسبه ضریب انتقال جرم k_c از عدد شروود (Sh) و رابطه (۱۲) استفاده می‌شود. $C_{i,s}$ غلظت بخار بر روی سطح ذره است که با فرض برابری فشار جزیی بخار در سطح مشترک با فشار اشباع بخار در دمای ذره از رابطه (۱۳) به دست می‌آید. $C_{i,\infty}$ غلظت بخار است که از حل معادله بقای گونه‌ها و از معادله (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$Sh_{AB} = \frac{k_c d_p}{D_{i,m}} = 2 + 0.6 Re_a^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}}, \quad Sc = \frac{\mu}{\rho D_{i,m}} \quad (12)$$

$$C_{i,s} = \frac{p_{sat}(T_p)}{RT_p} \quad (13)$$

$$C_{i,\infty} = Y_{i,\infty} \frac{M_{w,mix}}{M_{w,i}} \frac{P}{RT_{\infty}} \quad (14)$$

در رابطه (۱۲)، Sc عدد اشمیت، $D_{i,m} = 3 \times 10^{-5}$ ضریب نفوذ بخار در مخلوط، $M_{w,mix}$ جرم مولی مخلوط و $M_{w,i}$ جرم مولی بخار است.

۲-۲-۳- جوشش رطوبت

فشار بخار آب به دما بستگی دارد و با افزایش دما فشار بخار آب نیز افزایش می‌یابد. با افزایش فشار بخار تا فشار محیط جوشش آغاز می‌شود. در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد فشار بخار آب به فشار محیط می‌رسد. تبخیر سطحی تا جایی ادامه پیدا می‌کند که دمای ذره کمتر از دمای جوش باشد. بعد از رسیدن به دمای جوش، در دمای ثابت رطوبت موجود در ذره شروع به جوشیدن کرده تا رطوبت به طور کامل تبخیر شود. نرخ جوشش رطوبت از رابطه ۱۰ با صفر قرار دادن تغییرات دما به دست می‌آید [۱۳].

۲-۲-۴- آزاد شدن گازهای فرار

به طور کلی دو نوع مدل ساختاری و تجربی برای تحلیل فرآیند آزاد شدن گازهای فرار ارائه شده است. مدل‌های ساختاری بسیار پیچیده بوده و به ساختار مولکولی سوخت بستگی دارند. مدل‌های تجربی از روش‌هایی استفاده می‌کنند که پیچیدگی کمتری دارند. این مدل‌ها بر اساس زغال سنگ بیتومینس گسترش یافته‌اند. بدزویچ و هاکسلی^۱ مدل سینتیک تک نرخ^۲ را در سال (۱۹۷۰) ارائه دادند. در این مدل نرخ آزاد شدن گازهای فرار به میزان گازهای فرار موجود در ذره در هر لحظه و یک ثابت بستگی دارد که این ثابت به صورت آرنیوسی به دما ارتباط دارد. این مدل به صورت رابطه (۱۵) بیان می‌شود [۱۵].

$$-\frac{dm_p}{dt} = k(m_p - (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0}) \quad (15)$$

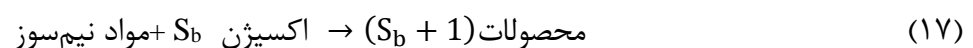
در رابطه بالا $f_{v,0}$ و $f_{w,0}$ به ترتیب کسر جرمی مواد فرار و کسر جرمی رطوبت است و m_p جرم ذره و k نرخ سینتیکی است که از رابطه شبه آرنیوسی (۱۶) به دست می‌آید. در رابطه (۱۵)، کاهش جرم ذره است. چون در زمان آزاد شدن گاز فرار مکانیزم دیگری اتفاق نمی‌افتد، نرخ کاهش جرم ذره معادل نرخ آزاد شدن گاز فرار می‌باشد.

$$k = A_1 e^{-\left(\frac{E}{RT_p}\right)} \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)، $A_1 = 3/5 \times 10^5$ و $E = 7/4 \times 10^7$ می‌باشد [۱۶].

۲-۲-۵- احتراق مواد نیم سوز

بعد از آزاد شدن گازهای فرار، مواد نیم سوز که از کربن و خاکستر تشکیل شده‌اند، باقی می‌مانند. فیلد^۳ در سال (۱۹۶۹) مدل سینتیک- نفوذ^۴ را برای واکنش مواد نیم سوز پیشنهاد داد. ایشان فرض کردند که هر دو عامل نفوذ و سینتیک در تعیین نرخ واکنش مواد نیم سوز تاثیر دارند. ایشان واکنش ناهمگن مواد نیم سوز را به صورت زیر در نظر گرفت [۱۷].



¹ Badzioch and Hawksley

² The Single Kinetic Rate Model

³ Field

⁴ The Kinetic-diffusion Surface Reaction Rate Model

در مدل نفوذ- سینتیک هر دو اثر سینتیک و نفوذ در نظر گرفته می شود. نفوذ اکسیژن و سینتیک واکنش غیرهمگن به ترتیب توسط روابط (۱۹) و (۲۰) بیان می شود. نرخ واکنش از رابطه (۱۸) به دست می آید [۱۷].

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p p_{ox} \frac{D_o R_o}{D_o + R_o} \quad (18)$$

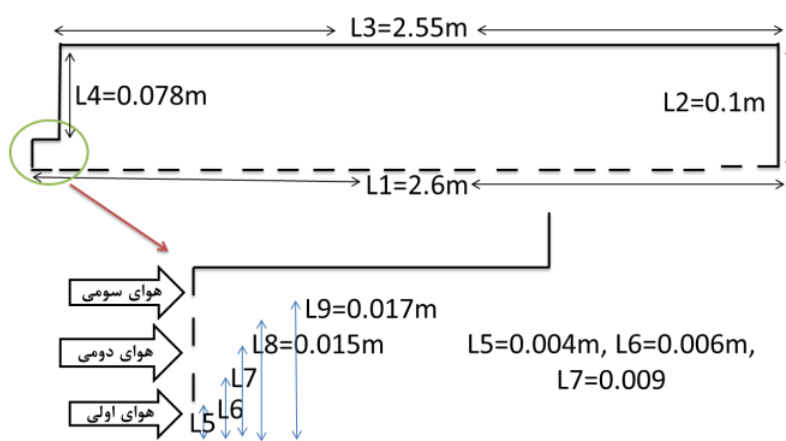
$$D_o = C_1 \frac{\left(\frac{T_p + T_\infty}{2}\right)^{0.75}}{d_p} \quad (19)$$

$$R_o = C_2 e^{-E/RT_p} \quad (20)$$

در روابط بالا A_p سطح ذره، p_{ox} فشار جزئی اکسیدکننده، T_p دمای ذره، T_p دمای محیط، d_p قطر ذره و R_o ثابت جهانی گازها است. $C_1 = 5 \times 10^{-12}$ ، $C_2 = 6/7$ و $E = 1/138 \times 10^4$ ضرایب ثابتی هستند.

۳- نتایج

جهت مطالعه احتراق ذرات سوخت مشتق شده از زباله هندسه آگرانیوتیس و همکارانش در آزمایشگاه دیگ بخار و نیروگاه های حرارتی دانشگاه آتن، مبنا کار قرار گرفت [۱۶]. ایشان با شبیه سازی احتراق سوخت مشتق شده از زباله نشان دادند که می توان از این نوع سوخت در کوره های زغال سنگ موجود به عنوان جایگزینی برای زغال سنگ استفاده کرد. هندسه مورد نظر و ابعاد آن در شکل (۱) نشان داده شده است. این محفظه احتراق دارای ۳ ورودی می باشد. از ورودی اول هوا و سوخت وارد می شود و از دو ورودی دیگر فقط هوا وارد می شود.



شکل ۱- هندسه مورد مطالعه و ابعاد آن [۱۶]

شرایط ورودی هوا در جدول (۱) مشاهده می شود. همچنین شرایط اولیه و توزیع قطر ذرات سوخت مشتق شده از زباله در جدول (۲) ارائه شده است، این توزیع بر مبنای رابطه روزین-راملر^۱ می باشد [۱۳]. در روش روزین-راملر کسر جرمی ذراتی که قطرشان از d بزرگتر باشد از رابطه زیر به دست می آید.

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n} \quad (21)$$

در رابطه بالا Y_d کسر جرمی ذراتی که قطرشان از d بیشتر است و \bar{d} متوسط قطر ذرات و n پارامتر پراکندگی می باشد. این ذرات از ورودی اولی تزریق می شوند.

جدول ۱- شرایط ورودی هوا [۱۶]

مقدار	سرعت و دما هوا در ورودی ها
۸/۳۶۶ m/s	ورودی اول
۴/۴۷۵ m/s	ورودی دوم
۳/۰۹۳ m/s	ورودی سوم
۳۷۳ k	دما ورودی اول، دوم و سوم

جدول ۲- شرایط اولیه و توزیع قطر ذرات تزریق شده [۱۶]

مقدار	متغیر
.۴۵۴ w/m.k	ضریب هدایت حرارت
۸۰۰ kg/m ²	چگالی
۱۲۲۰ kJ/kg.k	گرمای ویژه
۵/۴۹ m/s	سرعت ذرات
۳۷۳ k	دمای ذرات
۵×۱۰ ^{-۶} m	مینیمم قطر
۱۰ ^{-۳} m	ماکزیمم قطر
۲/۹۶×۱۰ ^{-۴} m	قطر متوسط
۱/۳۲ m	پارامتر پراکندگی

در جدول (۳) آنالیز تقریبی و آنالیز نهایی سوخت سوخت مشتق شده از زباله نشان داده شده است.

۳-۱- راست آزمایی نتایج

در شکل (۲) درصد مولی دی اکسید کربن در مخلوط خشک بر روی محور تقارن در مخلوط خشک مشاهده می شود. درصد مولی یک گونه در مخلوط خشک به صورت رابطه (۲۲) تعریف می شود [۱۶].

$$\% \chi_{i.dry} = \frac{\chi_i}{1 - \chi_{H_2O}} \times 100 \quad (22)$$

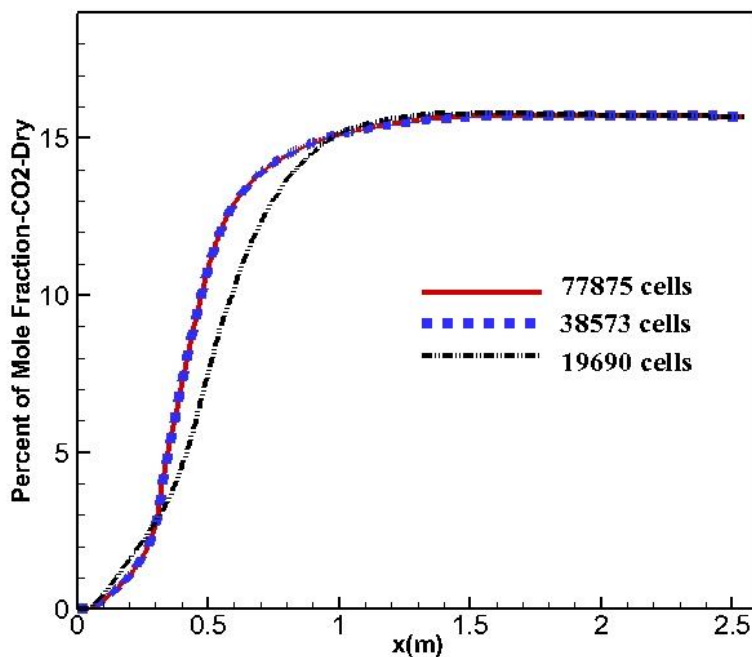
¹ Rosin-Rammler

جدول ۳- آنالیز نهایی و تقریبی سوخت مشتق شده از زباله [۱۶]

آنالیز تقریبی و نهایی (درصد وزنی)	
۶	درصد جرمی رطوبت
۸۲	درصد جرمی مواد فرار
۱۱/۸	درصد جرمی کربن ثابت
۰/۲	درصد جرمی خاکستر
۱۶/۸۳	ارزش حرارتی (MJ/kg)
۵۷/۱	درصد جرمی هیدروژن
۵	درصد جرمی هیدروژن
۲۳/۶۸	درصد جرمی اکسیژن
۰/۵۲	درصد جرمی نیتروژن

در رابطه (۲۲) درصد مولی گونه i در مخلوط خشک و χ_i کسر مولی گونه i و χ_{H_2O} کسر مولی بخار آب می‌باشد.

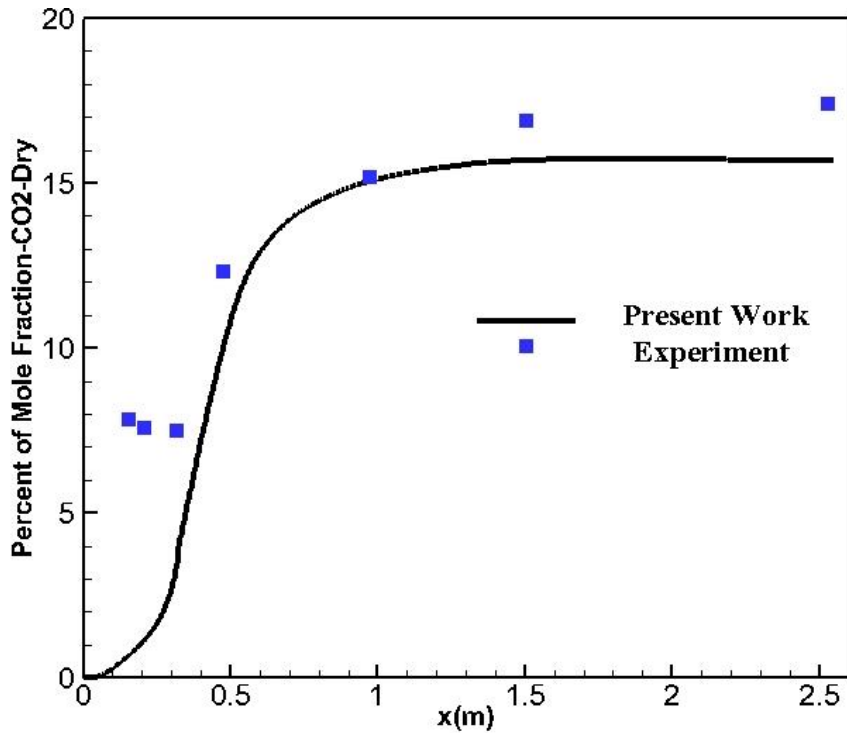
برای بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی با ساختار از ۳ شبکه با تعداد ۷۷۸۷۵ سلول، ۳۸۵۷۳ سلول و ۱۹۶۹۰ سلول استفاده شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود با ۳۸۵۷۳ سلول حل از شبکه مستقل شده است.



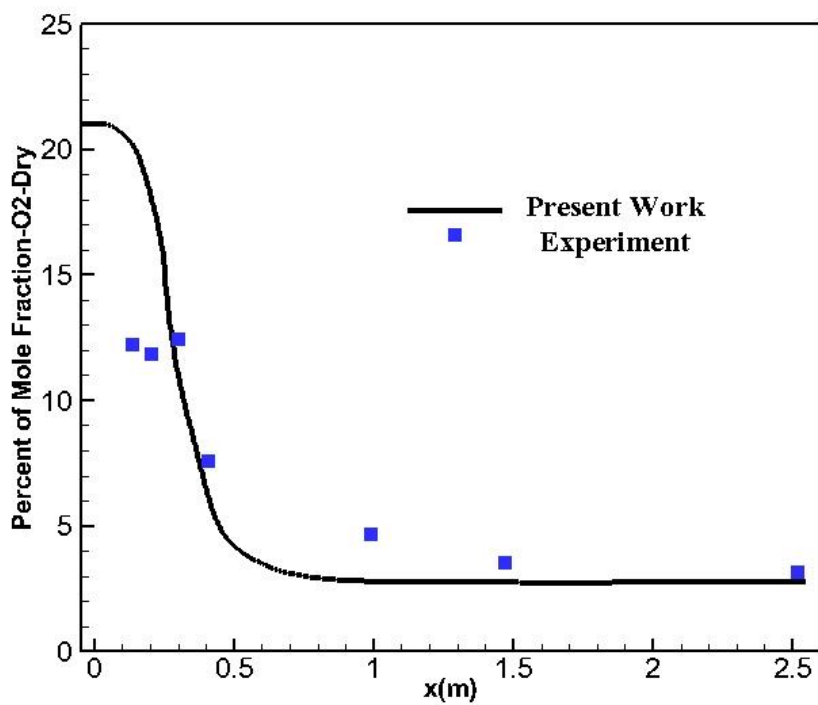
شکل ۲- درصد کسر مولی دی اکسید کربن در مخلوط خشک بر روی محور تقارن

در شکل‌های (۳) و (۴) درصد مولی دی اکسید کربن و اکسیژن در مخلوط خشک بر روی محور تقارن با نتایج تجربی مقایسه شده است. در ابتدا کوره اختلاف بین نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی برای درصد مولی

دی اکسید کربن در مخلوط خشک به ۹۲٪ و برای درصد مولی اکسیژن در مخلوط خشک به ۷۱٪ می‌رسد ولی این اختلاف کاهش یافته و در نقاط انتهایی برای درصد مولی دی اکسید کربن در مخلوط خشک به ۸٪ و برای درصد مولی اکسیژن در مخلوط خشک به ۳٪ می‌رسد.



شکل ۳- درصد کسر مولی دی اکسید کربن در مخلوط خشک بر روی محور تقارن

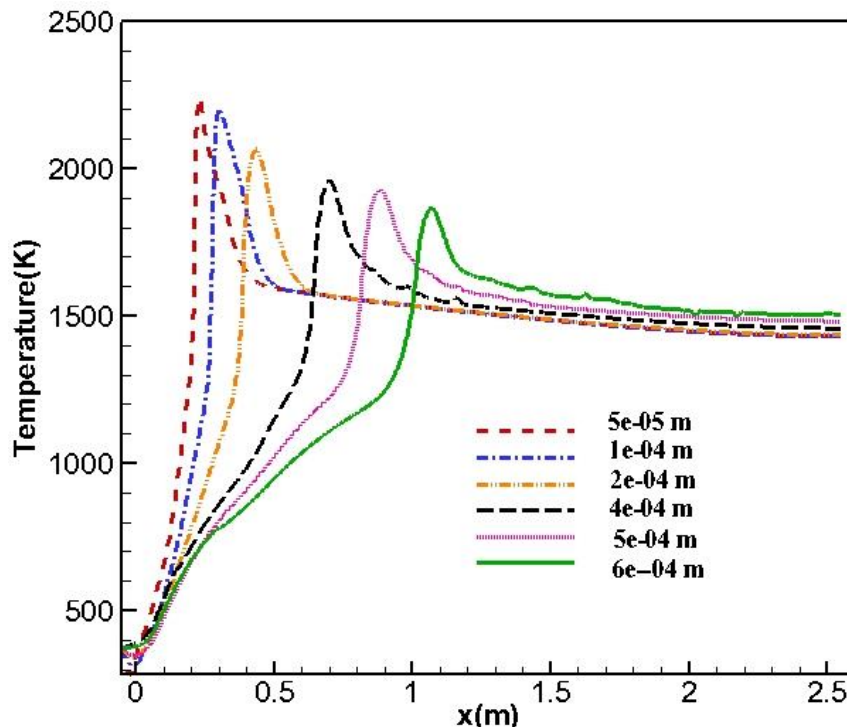


شکل ۴- درصد کسر مولی دی اکسید کربن در مخلوط خشک بر روی محور تقارن

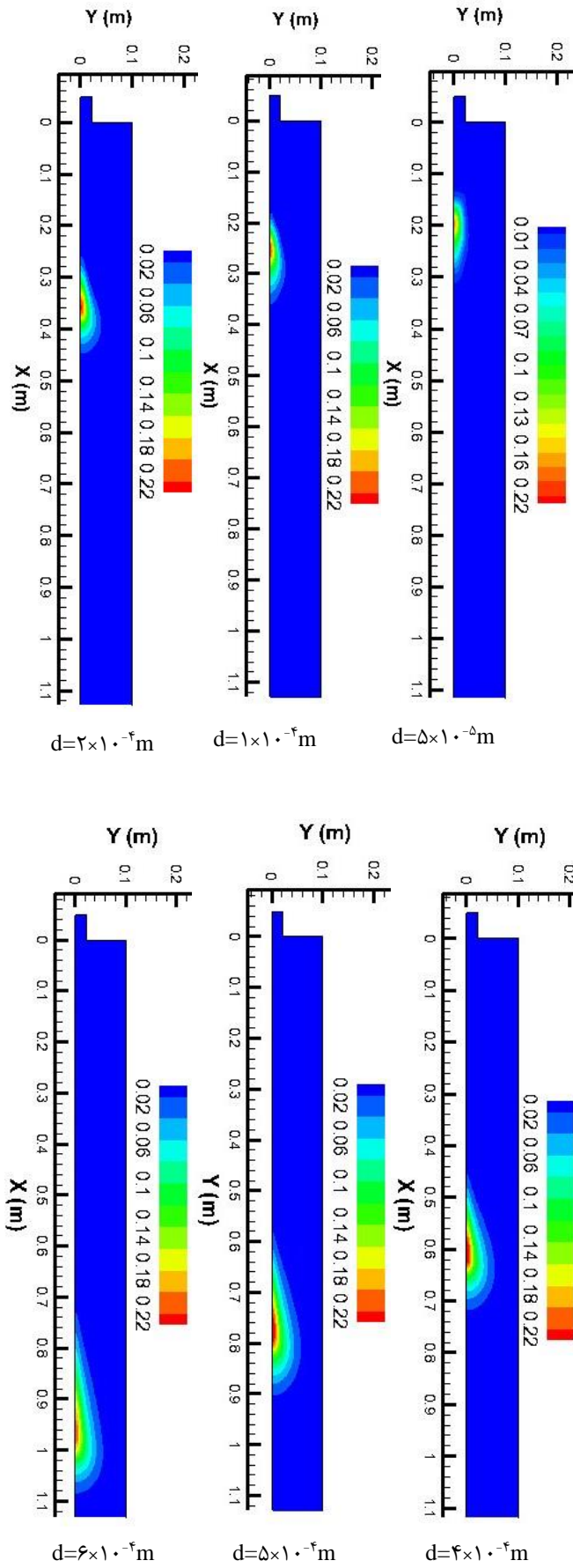
۳-۲- تاثیر قطر ذرات

اندازه ذرات سوخت پودر شده تاثیر زیادی در احتراق این نوع سوخت دارد. ذرات با قطر کوچکتر بهتر می-سوزند ولی از طرفی انرژی بیشتری باید صرف خرد کردن آنها شود. بنابراین فرآیند آسیاب کردن یکی از فرآیندهای مهم برای سوخت‌های جامد پودر شده است [۳]. در شکل (۵) نمودار دما بر روی محور تقارن برای قطرهای مختلف ذره نشان داده شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود با افزایش قطر ذرات مکان بیشینه دما در فاصله‌ی بیشتری از ورودی تشکیل می‌گردد. یعنی با افزایش قطر ذرات ناحیه‌ای که در آن احتراق انجام می‌شود، از ورودی فاصله می‌گیرد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش قطر، بیشینه دما کاهش می‌یابد.

در شکل (۶) کانتور کسر جرمی گازهای فرار برای قطرهای مختلف نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزایش قطر ذرات ناحیه‌ای که این گازها آزاد می‌شوند از ورودی دورتر شده و این امر سبب می‌شود ناحیه‌ای که احتراق صورت می‌گیرد از ورودی دورتر شود. از طرفی طول ناحیه‌ای که این گازها آزاد می‌شود، بیشتر شده و کشیده می‌شود. این امر سبب کاهش بیشینه دما با افزایش قطر ذرات می‌شود. افزایش قطر ذرات موجب تشکیل شعله در فاصله دورتر از ورودی شده و این امر باید در طراحی‌ها مورد توجه قرار گیرد. وقتی که ذره در فاصله دورتر از ورودی محترق می‌شود حجم مورد نیاز کوره بیشتر خواهد شد.



شکل ۵- نمودار دما بر روی محور تقارن برای ذرات سوخت مشتق شده از زباله با قطرهای مختلف

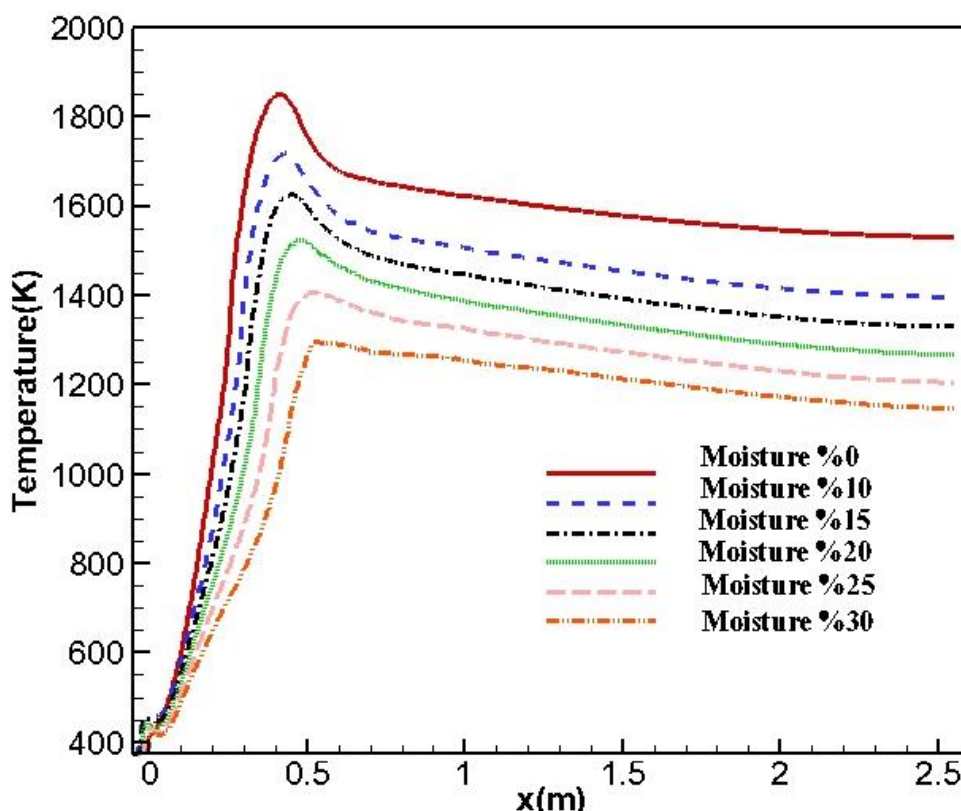


شکل ۶- کانتور کسر جرمی گازهای فرار

۳-۳- تاثیر رطوبت ذرات

درصد رطوبت ذرات سوخت جامد پودر شده یکی دیگر از پارامترهای مهم در احتراق این سوخت‌ها می‌باشد. درصد رطوبت زباله‌ها زیاد بوده ولی در طی فرآیندهای تهیه سوخت مشتق شده از زباله رطوبت آن را کاهش می‌دهند. بسته به نوع فرآیندهای طی شده درصد رطوبت ممکن است متفاوت باشد. درصد رطوبت سوخت مشتق شده از زباله ممکن است از ۲٪ تا ۳۰٪ و یا حتی بیشتر از آن باشد. در حالی که به طور معمول زباله‌های غیرفرآوری شده درصد رطوبت بیشتری دارند.

در شکل (۷) نمودار دما بر روی محور تقارن برای درصدهای رطوبت مختلف سوخت مشتق شده از زباله نشان داده شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود بیشینه دما با افزایش رطوبت کاهش می‌یابد. این امر به دلیل افزایش کسر جرمی بخار آب در مخلوط و همچنین کاهش درصد مواد قابل احتراق ذرات می‌باشد. از آنجایی که ظرفیت حرارتی بخار آب نسبت به سایر گونه‌ها بیشتر می‌باشد با افزایش کسر جرمی بخار آب، ظرفیت حرارتی مخلوط افزایش یافته و منجر به کاهش دما می‌شود. از طرف دیگر فرآیند تبخیر رطوبت نیز گرماگیر بوده و حرارت زیادی باید صرف تبخیر رطوبت شود. با افزایش رطوبت ذرات سوخت مشتق شده از زباله دما در تمام نقاط کاهش یافته است.



شکل ۷- نمودار دما بر روی محور تقارن با درصد رطوبت‌های مختلف برای ذرات سوخت مشتق شده از زباله

نتیجه گیری

با استفاده از روش اویلری-لاگرانژی احتراق سوخت مشتق شده از زباله با نرم افزار فلونتت شبیه سازی شد و نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و تطابق خوبی بین آنها مشاهده شد. با افزایش قطر ذرات سوخت مشتق شده از زباله بیشینه دما کاهش یافته و همچنین از ورودی فاصله می گیرد که علت این امر کاهش نرخ آزاد شدن گازهای فرار و همچنین افزایش زمان مورد نیاز برای احتراق واکنش غیرهمگن کربن است. بنابراین این امر باید در طراحی کوره های سوخت مشتق شده از زباله مورد توجه قرار گیرد. همچنین مشاهده شد که با افزایش رطوبت ذرات دما در کوره کاهش می یابد.

همانطوری که مشاهده شد، اختلاف بین نتایج تجربی و نتایج عددی در ابتدای کوره بیشتر از انتها می باشد. ممکن است این اختلاف ناشی از فرضیاتی ساده کننده ای باشد که در شبیه سازی احتراق سوخت مشتق شده از زباله در نظر گرفته شد. که این فرضیات عبارتند از: کروی بودن و عدم وجود تخلخل در ذرات سوخت مشتق شده از زباله. همچنین گازهای فرار که ترکیبی از گازهای هیدروکربنی مانند CH_4 ، C_3H_8 و گازهای CO و CO_2 است، در این شبیه سازی به صورت یک گونه مصنوعی با فرمول $C_xH_yO_z$ در نظر گرفته شد. لازم است در تحقیقات آینده با در نظر گرفتن ذرات سوخت مشتق شده از زباله به صورت توزیعی از شکل های مانند استوانه، کره و مکعب تاثیر آن را در احتراق این نوع ذرات بررسی شود. از چالش های دیگری که به نظر می رسد باید موضوع تحقیقات آینده احتراق سوخت مشتق شده از زباله قرار گیرد در نظر گرفتن تخلخل در این ذرات و اثر آن در احتراق غیرهمگن می باشد.

مراجع

- [1] Liakos, H. H., Thoelogs, K. N., Boundovis, A. G., and Markatos, N. C., "Pulverized Coal Char Combustion: The Effect of Particle Size on Burner Performance", Applied Thermal Engineering, Vol. 18, No. 11, pp. 981-989, (1998).
- [2] Weber, R., Kupka, T., and Zajac, K., "Jet Flames of a Refuse Derived Fuel", Combustion and Flame, Vol. 156, No. 4, pp. 922-927, Apr. (2009).
- [3] Pallares, J., Gil, A., Cortes, C., and Herce, C., "Numerical Study of Co-firing Coal and Cynara Cardunculus in a 350 MWe Utility Boiler", Fuel Processing Technology, Vol. 90, No. 10, pp. 1207-1213, (2009).
- [4] Yin, C., Kær, S. K., Rosendahl, L., and Hvid, S. L., "Co-firing Straw with Coal in a Swirl-stabilized Dual-feed Burner: Modeling and Experimental Validation", Bioresource Technology, Vol. 101, No. 11, pp. 4169-4178, (2010).
- [5] Agraniotis, M., Nikolopoulos, N., Grammelis, P., and Kakaras, E., "Numerical Investigation of Solid Recovered Fuels' Co-firing with Brown Coal in Large Scale Boilers-evaluation of Different Co-combustion Modes", Fuel, Vol. 89, No. 12, pp. 3693-3709, (2010).

- [6] Lu, H., Ip, E., Scott, J., Foster, P., Vickers, M., and Baxter, L. L., "Effects of Particle Shape and Size on Devolatilization of Biomass Particle", *Fuel*, Vol. 89, No. 5, pp. 1156–1168, (2010).
- [7] Gubba, S. R., Ma L., Pourkashanian M., and Williams, A., "Influence of Particle Shape and Internal Thermal Gradients of Biomass Particles on Pulverised Coal/Biomass Co-fired Flames", *Fuel Processing Technology*, Vol. 92, No. 11, pp. 2185–2195, (2011).
- [8] Shirolkar, J. S., Coimbra, C. F. M., and McQuay, M. Q., "Fundamental Aspect of Modeling Turbulent Particle Dispersion in Dilute Flows", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 22, No. 4, pp. 363-399, (1996).
- [9] Poinso, T., and Veynante, D., "*Theoretical and Numerical Combustion*", 2nd ed. R.T. Edwards, Inc, pp. 540-, (2005).
- [10] Ettouati, H., Boutoub, A., and Benticha, H., "Radiative Heat Transfer in Pulverized Coal Combustion: Effects of Gas and Particles Distributions", *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, Vol. 31, pp. 345-353, (2007).
- [11] Magnussen, B. F., and Hjertager, B. H., "On Mathematical Models of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion", *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 16, No. 1, pp. 719–729, (1976).
- [12] Williams, A., Jones, J. M., Ma, L., and Pourkashanian, M., "Pollutants From the Combustion of Solid Biomass Fuels", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 38, No. 2, pp. 113-137, (2012).
- [13] Fluent Inc, *Fluent 6.3.26 User's Guide*, (2006).
- [14] Incropera, F. P., and DeWitt, D. P., "*Introduction to Heat Transfer*", 4th ed. Wiley, pp. 912-, (2001).
- [15] Badzioch, S., and Hawksley, P. G. W., "Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles", *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, Vol. 9, No. 4, pp. 521-530, (1970).
- [16] Agraniotis, M., "Coal Substitution of Alternative and Support in Fuel Boilers for Pulverized Fuel CO₂ Emission Reduction", Ph.D. Thesis, National Technical University of Athens, (2010).
- [17] Field, M. A., "Rate of Combustion of Size-graded Fractions of Char from a Low Rank Coal Between 1200 K–2000 K", *Combustion and Flame*, Vol. 13, No. 3, pp. 237–252, (1969).

فهرست نمادهای انگلیسی

- A_p : مساحت ذره
 c_p : ظرفیت حرارتی سیال
 C : غلظت گونه‌ها
 \bar{C}_f : متوسط غلظت محلی سوخت
 \bar{C}_{O_2} : متوسط غلظت محلی اکسیژن
 \bar{C}_p : متوسط غلظت محلی محصولات احتراق
 \bar{d} : متوسط قطر ذرات
 d_p : قطر ذرات
 $D_{i,m}$: ضریب نفوذ بخار در مخلوط
 Da : عدد دامکولر
 $f_{v,0}$: کسر مواد فرار ذره
 $f_{w,0}$: کسر جرمی رطوبت
 G : شدت تشعشع ورودی به ذره
 h : ضریب انتقال حرارات جابجایی
 h_{fg} : دمای نهان تبخیر آب
 k : انرژي جنبشی آشفستگی
 k_c : ضریب انتقال جرم
 k_∞ : ضریب هدایت حرارت سیال
 m_p : جرم ذره
 $m_{p,0}$: جرم اولیه ذره
 M : جرم مولی
 n : پارامتر پراکنندگی
 Nu : عدد ناسلت
 p_{ox} : فشار جزیی اکسیدکننده
 Pr : عدد پرانتل
 R_o : ثابت جهانی گازها
 Re : عدد رینولدز
 Sc : عدد اشمیت
 Sh : عدد شروود
 T_p : دمای ذره
 T_{vap} : دمای تبخیر آب
 T_∞ : دمای جریان سیال اطراف ذره

u : سرعت سیال

u_p : سرعت ذره

Y_d : کسر جرمی ذراتی

نمادهای یونانی

ε : اتلاف انرژی آشفتگی

ε_p : ضریب صدور تشعشعی ذره

μ : لزجت سیال

ν : لزجت سینماتیکی

ρ : چگالی سیال

σ : ضریب استفان - بولتزمن

χ : کسر مولی

Abstract

The RDF combustion was simulated by Fluent software and the results were validated against the experimental results. As the flow is two-phase, for simulating fluid flow Eulerian approach and for tracking solid particle Lagrangian approach have been used. For modeling devolatilization, the single kinetic rate devolatilization model and for modeling char burning the diffusion-kinetic surface reaction rate model have been used. For simulating fluid flow Navier-Stokes equation with Favre averaging and for modeling Reynolds stress k- ϵ standard model have been used. It was observed that by increasing particles diameter, maximum temperature of fluid decreases and the hot zone gets farther from the inlet. It was also observed by increasing particles moisture maximum temperature decreases in furnace.