شبیه‌سازی عددی احتراق در اجاق‌های با سوخت زیست‌توده

حامد اسدی [۱]، محمدحسین عباسپورفرد [۲*]، محمدعلی ابراهیمی نیک [۳]، جواد زارعی [۴]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد (hamed.asadi@mail.um.ac.ir)
۲. استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد (abaspour@um.ac.ir)
۳. استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد (ebrahimi-nik@um.ac.ir)
۴. مربی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد(javadzareei@um.ac.ir)

چکیده

زیست‌توده به‌عنوان منبع تولید انرژی در سراسر جهان موردتوجه قرارگرفته است. در میان روش‌های مختلف موجود برای تولید انرژی مبتنی بر زیست‌توده، گازیسازی زیست‌توده ازجمله روش‌هایی است که به‌طور گسترده در حال مطالعه است. تبدیل شدن زیست‌توده به گاز، یک فرآیند تبدیل حرارتی شیمیایی است که در اجاق رخ می دهد. عوامل مختلفی مانند نوع سوخت، طراحی اجاق و پارامترهای عملیاتی بر عملکرد گازساز تأثیر می‌گذارد. به کمک مدل‌سازی عددی می‌توان شرایط بهینه را برای یک اجاق با ویژگی‌های مشخص بدون انجام آزمایش‌های تجربی که هم زمان‌بر و هم گران است، تعیین کرد. در این تحقیق تلاش شده است ضمن بررسی مدل‌سازی‌های انجام‌شده، بر اساس معیارهای خاص مانند نوع گازساز، ماده اولیه، ملاحظات مدل‌سازی و پارامترهای ارزیابی‌شده دسته‌بندی شود تا درنهایت ارزیابی‌های مقایسه‌ای از تکنیک‌های مدل‌سازی و خروجی برای مدل‌ها انجام شود. نرم‌افزار ANSYS FLUENT یک روش مناسبتر برای شبیه سازی احتراق زیست توده در بسترهای یکپارچه و سیال است که با شبیه سازی شعله، سیستم اندازه گیری نرخ های مختلف جریان در محدوده احتراق پایدار انجام می شود. همچنین تحقیقات مختلف در این زمینه نشان داد که مدل مناسب برای بررسی احتراق، مدل k-ε و مدل اتلاف گردابی برای بررسی آلاینده های خروجی اجاق می باشد.

کلمات کلیدی:
شبیه‌سازی، مدل سازی عددی، احتراق، اجاق، زیست‌توده

*نویسنده مسئول

شبیه‌سازی عددی احتراق در اجاق‌های با سوخت زیست‌توده

مقدمه

جهان در سال‌های اخیر با بحران بزرگ انرژی مواجه است. تقاضای روزافزون انرژی و استفاده از سوخت‌های فسیلی به افزایش نگران کننده‌ی تغییرات آب‌وهوا و گرم شدن زمین منجر شده است. برای مقابله با مشکلات مربوط به استفاده بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی، تحقیقات به سمت منابع جایگزین انرژی هدایت‌شده است. این امر به تأمین انرژی موردنیاز و همچنین کاهش مشکلات زیست‌محیطی کمک می‌کند. در مقایسه با منابع متعارف انرژی که در تعداد محدودی از کشورها متمرکز هستند، منابع انرژی‌های تجدید پذیر در مناطق جغرافیایی مختلف به اشکال گوناگون یافت می‌شوند؛ بنابراین اعتقاد بر این است بهره‌مندی از فناوری‌های انرژی تجدید پذیر به‌طور قابل‌توجهی به استقلال انرژی منطقه‌ای همراه با مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی کمک می‌کند. در این راستا، زیست‌توده به‌عنوان منبع اصلی انرژی جایگزین با دسترسی آسان و اثرات زیست‌محیطی کمتر نسبت به سوخت‌های فسیلی موردتوجه واقع‌شده است.

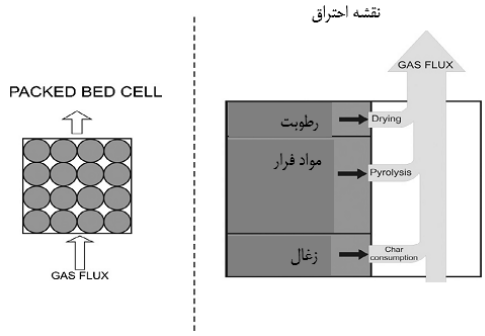
زیست‌توده

زیست‌توده یک منبع انرژی مهم به شمار می‌آید. امروزه به دلیل دسترسی محدود به منابع سوخت‌های فسیلی، بیومس و دیگر انرژی های تجدید پذیر برای تولید انرژی حرارتی و الکتریسیته با انتشار آلایندگی کمتر موردتوجه قرارگرفته‌اند. بیومس در کنار سه منبع انرژی زغال، نفت و گاز طبیعی برشمرده می‌شود(Karim & Akhanda, 2011; Yin et al., 2008). مشکل عمده استفاده از زیست‌توده حجیم بودن و شکل نامناسب آن است. بیشتر اشکال زیست‌توده در مقایسه با سوخت‌های فسیلی، چگالی انرژی پایینی دارند. به‌عنوان مثال، محتوای انرژی زیست‌توده چوبی خشک‌شده در هوا حدود ۱۲–۱۵ GJ/t است درحالی‌که برای زغال‌سنگ حدود ۲۰–۲۵ GJ/t (مقادیر حرارتی کم) است (IEA, 2007). بنابراین لمس، ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل زیست‌توده به شکل خام آن در مقایسه با سوخت‌های معمولی پرهزینه‌تر و سخت می‌باشد. برای استفاده مفید از زیست‌توده، بهبود خواص آن ضروری است که توانایی ذخیره و حمل‌ونقل آن را افزایش دهد. یکی از این روش‌ها تبدیل زیست‌توده جامد به سوخت مایع یا گاز است که با یکی از این دو روش قابل انجام است: تبدیل بیوشیمیایی و ترموشیمیایی. در روش ترموشیمیایی، گازی‌سازی زیست‌توده به دلیل شامل بودن طیف گسترده‌ای از مواد اولیه زیست‌توده، بیشتر مورداستفاده قرار می‌گیرد. تبدیل به گاز زیست‌توده شامل اکسیداسیون جزئی زیست‌توده جامد، در حضور گرما، به سوخت‌های گازی یا مایع است تبدیل به گاز زیست‌توده فرآیند پیچیده‌ای شامل واکنش‌های شیمیایی مختلف، فرآیندهای انتقال گرما و جرم و تغییرات فشار است. گازی شدن به‌طورکلی، تبدیل مواد اولیه جامد یا مایع به سوخت مفید و مناسب گازی یا خوراک شیمیایی است (Basu, 2010).

بسته به محیط گازی مورداستفاده، گازیفایرها اساساً به‌عنوان گازیفایرهای اکسیژن، بخار یا هوا طبقه‌بندی می‌شوند. فرآیند تبدیل به گاز در چهار مرحله انجام می‌شود. خشک‌کردن، تجزیه در اثر حرارت، اکسیداسیون (احتراق) و احیا (گازی شدن کربن). در یک گازیفایر معمولی خشک شدن در دمای کمتر از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، تجزیه در اثر حرارت در محدوده دمایی ۱۵۰–۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، اکسیداسیون در محدوده ۷۰۰–۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و احیا در محدوده ۸۰۰–۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد (Basu, 2006). در فرآیند خشک‌کردن، رطوبت موجود در سوخت تبخیر می‌شود و باعث آزاد شدن بخار می‌شود. در مرحله پیرولیز، جزء فرار ماده اولیه با گرم شدن تبخیر می‌شود. بخار فراری که تولید می‌شود مخلوطی از هیدروژن، مونوکسید کربن، دی‌اکسیدکربن، متان، گازهای

هیدروکربنی، قطران و بخارآب است (Kivisaari et al., 2004). واکنش گازی شدن ذرات به عوامل بسیاری مانند دمای تجزیه در اثر حرارت، سرعت گرمایش، اجزای معدنی و فشار تجزیه در اثر حرارت بستگی دارد(Basu, 2006). گازیفایرها به چند گروه (الف) بستر ثابت (همچنین به‌عنوان بستر متحرک شناخته می‌شوند)، (ب) بسترسیال و (ج) گازی‌کننده‌های جریان حباب‌دار ، بسته به نحوه تماس گاز و سوخت با یکدیگر طبقه‌بندی می‌شوند (Basu, 2006). عملکرد فرآیند گازی سازی به ویژگی‌های مواد اولیه، طراحی اجاق و پارامترهای عملیاتی بستگی دارد (Sharma, 2011). مشخصه‌های خوراکی که تأثیر عمده‌ای بر فرآیند تبدیل به گاز دارند عبارت‌اند از: رطوبت، مواد فرار، محتوای خاکستر، زغال، هدایت حرارتی، ترکیبات آلی و اجزای غیرآلی(Sharma, 2011).

آگاهی در مورد مکانیسم‌ها و فرایندهای دخیل در سیستم‌های احتراق برای دستیابی و توسعه یک سیستم احتراق کارآمد حائز اهمیت است (Yin et al., 2008). همان‌طور که مشاهده می‌شود این فرایندها در شکل ۱ به‌طورکلی به نمایش گذاشته‌شده است(Gómez et al., 2014). اما تحقیقات تجربی این سیستم‌ها به دلیل دسترسی محدود و ناهمگن بودن بستر بسیار دشوار است ازاین‌رو مدل‌سازی عددی در این دست سیستم‌های احتراق که ترکیبی از مدل تئوری و داده‌های تجربی هستند، برای تحلیل در شرایط کاری مختلف بسیار مفید است (Bhuiyan et al., 2016; Bhuiyan & Naser, 2015; Ström & Thunman, 2013)



شکل ۱: شماتیک فرایند احتراق سوخت های جامد زیستی

مدل‌سازی احتراق زیست توده

مدل‌های ریاضی به ابزاری مفید برای نمایش وضعیت واقعی شرایط و تأثیر پارامترها تبدیل‌شده‌اند. در این رابطه، مطالعات مختلفی برای مدل‌سازی فرآیندهای تبدیل به گاز به‌منظور پیش‌بینی عملکرد گازی‌ساز زیست‌توده به‌عنوان ماده اولیه انجام‌شده است. مدل‌های گازی سازی برای مطالعه فرآیندهای ترموشیمیایی که در طی ارزیابی تأثیر پارامترهای عملیاتی، مانند محتوای رطوبت، نسبت هوا به سوخت، ترکیب گاز تولیدشده و ارزش حرارتی گاز تولیدشده استفاده می‌شوند. مطالعه تطبیقی مدل‌های توسعه‌یافته برای دانستن کاربرد و محدودیت‌های آن‌ها به‌منظور پیش‌بینی عملکرد و بهبود طراحی گازیفایرها با در نظر گرفتن ماده اولیه ضروری است(Babu & Sheth, 2006; Puig-Arnavat et al., 2010; Sreejith et al., 2013). با توجه به پیچیدگی ذاتی فرآیندهای گازی‌سازی زیست‌توده، مدل‌سازی و پیش‌بینی عملکرد این فرآیندها هنوز در مرحله تحقیقاتی و نوظهور هستند. روش‌های مدل‌سازی ریاضی فرآیند گازی‌سازی را

می‌توان به: ۱-تعادل ترمودینامیکی، ۲- مدل جنبشی[1] و ۳-دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) طبقه‌بندی کرد. در بخش‌های بعدی مروری بر پژوهش‌های اخیر انجام شده با استفاده از مدل‌سازی CFD و هر رویکرد مدل‌سازی با ارائه مقدمه‌ای و به دنبال آن نتایج کلیدی از مطالعات مختلف مورد بحث قرارگرفته است(Warnatz et al., 2006).

مدل‌های CFD[2]

مدل‌های CFD برای پیش‌بینی توزیع دما، غلظت و سایر پارامترها در اجاق استفاده می‌شوند. مدل‌های CFD بر اساس راه‌حل‌های مجموعه‌ای از معادلات هم‌زمان برای حفظ جرم، تکانه، انرژی و گونه‌ها بر روی یک منطقه گسسته از گازساز هستند. اگر هیدرودینامیک اجاق به‌خوبی شناخته‌شده باشد، مدل‌های CFD در پیش‌بینی دما و بازده گاز در اطراف اجاق بسیار دقیق عمل می‌کند. مدل‌سازی CFD گازی شدن زیست‌توده شامل ترکیبی از جریان ذرات متراکم و ترکیبات شیمیایی خاص بوده که ترکیب این دو در CFD بسیار چالش‌برانگیز است. مدل‌های CFD به‌طور گسترده برای مطالعه ویژگی‌های عملکرد انواع مختلف گازسازهای زیست‌توده مورداستفاده قرارگرفته‌اند (Pepiot et al., 2010). در جدول۱ برخی از پژوهش‌های اخیر به‌صورت خلاصه فهرست شده‌است.

جدول ۱- خلاصه‌ای از مدل‌های مورداستفاده در شبیه‌سازی احتراق سوخت های جامد زیستی به روش CFD

شماره	نویسنده و سال انتشار	توضیحات مدل	سوخت موردنیاز	پارامترهای موردنظر
۱)	اسچالر و همکاران (۲۰۰۹)	مدل تجربی برای انتشار فرار	براده چوب	دمای اجاق، به دست آوردن مقادیر گازهای آلاینده در هنگام احتراق و بهینه‌سازی اجاق
۲)	گونگور (۲۰۱۱)	حالت تک‌بعدی، هم‌دما، پایدار و دینامیک سیالات بر اساس تئوری دوفازی سیال شدن است. تبدیل قطران در مدل در نظر گرفته‌شده است	زیست‌توده	دمای گازیفایر، سرعت عملیاتی، نسبت هم ارزی، اندازه ذرات زیست‌توده و نسبت زیست‌توده به بخار
۳)	جون ژائه (۲۰۱۲)	این مدل از روش اویلری برای فاز سیال و روش ذرات گسسته برای فاز جامد استفاده می‌کند که نیروهای تماس ذرات را در نظر می‌گیرد.	چوب کاج	دمای اجاق، نسبت هم ارزی، نسبت بخار به زیست‌توده
۴)	جاناجره و همکاران (۲۰۱۳)	شبیه‌سازی عددی بر روی یک مش با وضوح‌بالا انجام می شود که فازهای جامد و گازی، آشفتگی k-ε و مدل CFD واکنش‌دهنده را محاسبه می‌کند.	براده‌های چوبی	ترکیب گاز، راندمان گاز سرد، راندمان تبدیل کربن، دمای راکتور
۵)	گومز و همکاران (۲۰۱۴)	یک مدل فرعی تراکم بستر، انقباض ذرات و مکانیک بستر می‌تواند به تخمین واقع‌بینانه فرایندهای درگیر در احتراق زیست‌توده کمک کند	چوب	نرخ احتراق، حداکثر دما و تکامل گذرا ارتفاع بستر، ضخامت‌های زغال، خشک‌کردن، تبخیر زدایی و زغال‌سنگ برای شارهای مختلف توده‌هوا

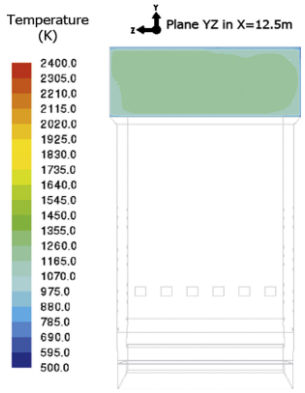
[1] Kinetic Model
[2] Computational fluid dynamics

۶)	ماندال و همکاران (۲۰۱۷)	با استفاده از مدل احتراق غیر مخلوط رفتار جریان، عملکرد گازیفایر پایین رفته و ترکیب گاز سنتز موردبررسی قرار گرفت.	خرده چوب	رفتار جریان، توزیع دما در گازیفایر، مقدار گازهای فرار و راندمان حرارتی
۷)	ماتزینگ و همکاران (۲۰۱۸)	شبیه‌سازی اجاق آبشاری شکل به روش CFD و مقایسه نتایج آن با داده‌های تجربی و اعتبار سنجی با مدل آزمایشگاهی و مدل صنعتی	زباله شهری	زمان تأخیر احتراق، نرخ احتراق، سرعت جلوی واکنش و نرخ تبدیل جرم
۸)	پاندی و همکاران (۲۰۲۱)	مدل CFD برای مدل متقارن محور دوبعدی یک گاز ساز پایین جریان ایمبرت انجام‌شده است. ترکیب گاز تولیدکننده و دمای گازساز در نسبت‌های هم ارزی مختلف (ER)یعنی ۰/۲۵ تا ۰/۶۰ موردبررسی قرار گرفت.	پلت زیست‌توده	کربن مونوکسید، هیدروژن، کربن دی اکسید، نسبت هوا به سوخت (ER)

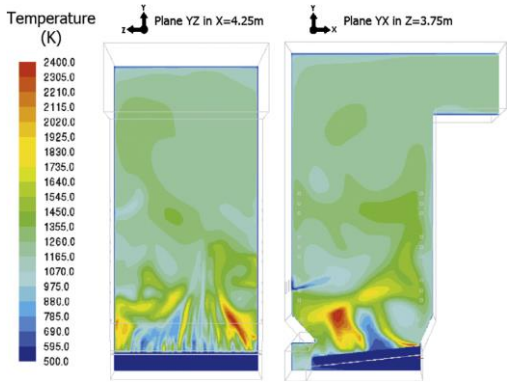
شبیه‌سازی با نرم‌افزار ANSYS Fluent

سنتنوگونزالز و همکاران (۲۰۱۷)، از تجزیه‌وتحلیل CFD برای مدل‌سازی احتراق باگاس نیشکر در یک اجاق صنعتی استفاده کرد. زیست‌توده به‌عنوان یک‌فاز گسسته در نظر گرفت و تعامل آن با فاز گاز مداوم با استفاده از توابع داخلی ANSYS Fluent و همچنین در کدهای UDF مدل‌سازی شد(Centeno-González et al., 2017).

شکل ۳ خطوط هم دما را نشان می‌دهد که در آن مناطق واکنش قوی در نزدیکی رنده قابل‌مشاهده است. می‌توان مشاهده کرد که ناحیه دمای پایین روی رنده (صفحه مشبک) کاملاً با مناطقی با محتوای اکسیژن بالا مطابقت دارد و مناطق با دمای بالا دقیقاً در اطراف هستند که مشخصه شعله انتشاری است که اکسیدان را در داخل دارد. از طرف دیگر شکل ۲ خطوط هم دمای بخش خروجی اجاق را نشان می‌دهد که در آن دمای متوسط حدود ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد با اندازه‌گیری‌های گزارش‌شده سازنده مطابقت دارد(Centeno-González et al., 2017).

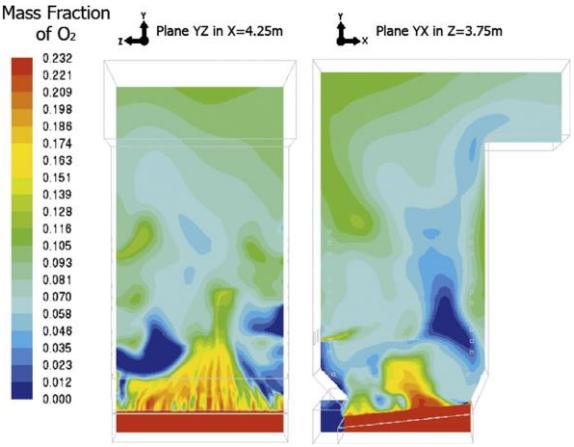


شکل ۲: کانتوری از دمای قسمت خروجی اجاق

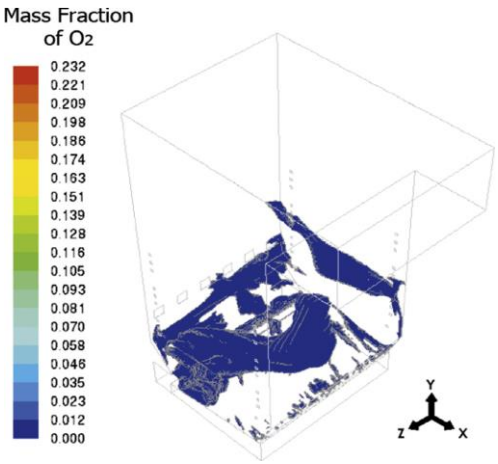


شکل ۳: کانتور دما

خطوط نسبت جرمی اکسیژن در شکل ۴ نشان داده‌شده است. تصویر سمت چپ در این شکل به‌وضوح نشان می‌دهد که چگونه شکل شعله غیر مخلوط، ایجادشده و از رنده خارج می‌شود. مناطق کم اکسیژن را می‌توان با نگاه کردن به مناطق آبی ردیابی کرد. بااین‌حال، این را می‌توان با استفاده از سطح ایزو نشان داده‌شده در شکل ۵ به بهترین وجه تجسم کرد. این سطح همسان می‌تواند برای مکان‌یابی مناطقی که ممکن است به توزیع بهتر هوای ثانویه به‌منظور بهبود احتراق نیاز داشته باشند، استفاده شود (Centeno-González et al., 2017).



شکل ۴: کانتور نسبت جرمی اکسیژن



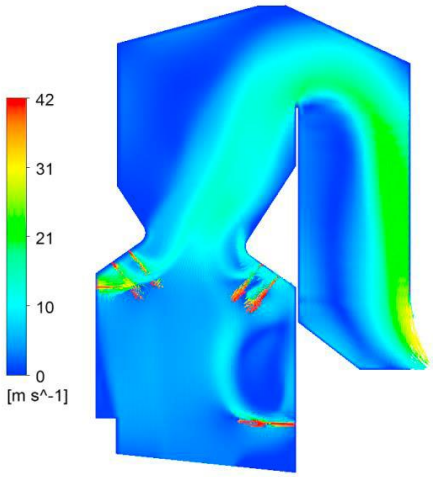
شکل ۵: سطح ایزو مناطقی را نشان می‌دهد که نسبت جرمی اکسیژن نزدیک به صفر است.

نتایج این شبیه‌سازی درک روشنی از پدیده‌هایی که یک‌ذره زیست‌توده از حرارت اولیه تا سوختن زغال‌سنگ و تبدیل آن به خاکستر می‌گذراند را ارائه داد. نشان داده شد که احتمال سوختن ذرات بزرگ‌تر در رنده بیشتر است و داشتن احتراق اولیه در توزیع اندازه اولیه سوخت زیست‌توده برای احتراق کارآمد بسیار مهم است. این شبیه‌سازی همچنین به درک بهتر توزیع فرار و اکسیژن در مناطق مختلف درون اجاق کمک کرد. جداسازی[3] به‌طور خاص مهم است زیرا به ما در پیش‌بینی میدان حرارتی و درنهایت بهبود کارایی اجاق کمک می کند. آگاهی از مناطق کم اکسیژن همچنین می‌تواند به اپراتورها کمک کند تا جریان هوا و زاویه تزریق را به‌منظور بهبود احتراق تنظیم کنند. چنین تجزیه‌وتحلیلی می‌تواند به‌عنوان یک اقدام ارزان برای آزمایش پارامترهای مختلف طراحی و درک تأثیر آن‌ها بر عملکرد اجاق قبل از انجام هرگونه اقدام پرهزینه در عمل استفاده شود(Centeno-González et al., 2017).

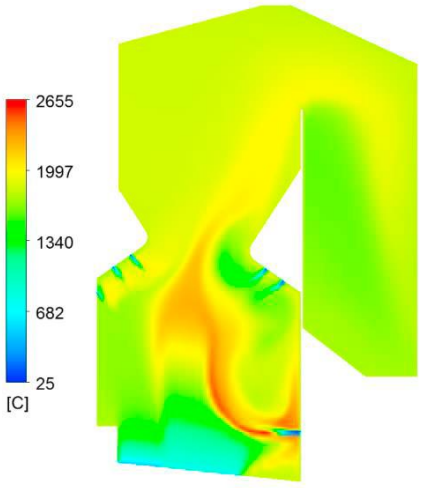
[3] Devolatilization

سیلوا و همکاران (۲۰۱۷)، تجزیه‌وتحلیل دینامیک سیالات محاسباتی یک دیگ بخار زیست‌توده صنعتی را گزارش می‌دهد. تجزیه‌وتحلیل با استفاده از یک مدل CFD برای احتراق گازهای فرار آزادشده از احتراق زیست‌توده در رنده انجام شد. رفتار کلی دیگ را می‌توان از طریق متغیرهای اصلی نتایج CFD درک کرد. این نتایج برای شرایط عملیاتی اسمی، زمانی به دست آمد که به یک حالت شبه‌پایدار رسید.

شکل ۶ سرعت گازهای دودکش داخل دیگ و شکل ۷ مشخصات دمایی در داخل دودکش دیگ بخار را نشان می‌دهد. حداکثر دمای به‌دست‌آمده تقریباً ۲۶۵۵ درجه سانتی‌گراد است. این پیک دمای بیش از پیش‌بینی‌شده نتیجه مدل اتلاف سرعت محدود/گردابی[4] است که به‌عنوان مدل احتراق استفاده شد(Yin et al., 2008). بنابراین، مقدار پیش‌فرض (A = 4) مورداستفاده در مدل اتلاف گردابی باید برای مطالعه تنظیم شود زیرا پیک دمای محاسبه‌شده با ثابت A مرتبط است(Silva et al., 2017).



شکل ۶: سرعت گازهای دودکش داخل دیگ بخار

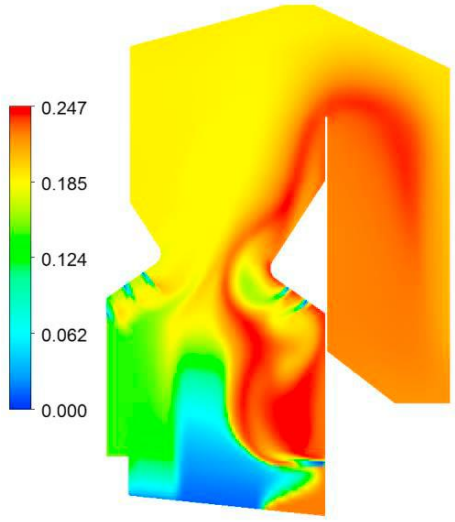


شکل ۷: توزیع دما در داخل دود کش دیگ بخار

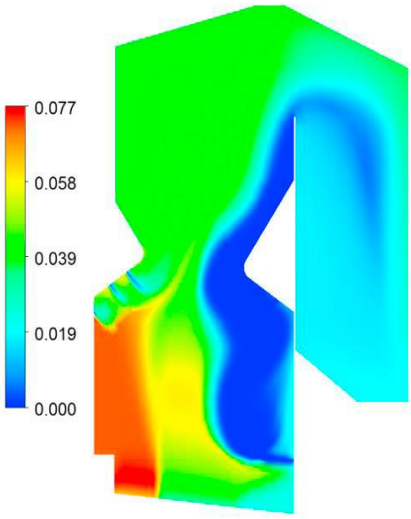
در داخل اجاق اختلاط بین هوای احتراق و مواد فرار آزادشده از زیست‌توده همیشه بسیار مهم است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود به دلیل نفوذ پاشش هوای ثانویه تحتانی در دیواره سمت راست، افزایش ناگهانی دما به دلیل مخلوط شدن گازها با هوای تأمین‌شده توسط نازل وجود دارد؛ بنابراین، پیکربندی جت‌های هوا برای بهبود فرآیند احتراق و اختلاط حیاتی است. به‌این‌ترتیب انتشار آلاینده ممکن است به دلیل طراحی مناسب دیگ کاهش یابد. علاوه بر این، شکل ۶ نشان می‌دهد که در ناحیه مبدل‌های حرارتی، نزدیک خروجی دیگ بخار، سرعت گازهای دودکش افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت به دلیل گردابی است که در این مکان ایجاد می‌شود و ممکن است مشکلاتی با فرسایش لوله‌های مبدل حرارتی ایجاد شود (Silva et al., 2017).

[4] Eddy-Dissipation

شکل ۸ نسبت جرمی دی‌اکسید کربن و شکل ۹ مونوکسید کربن داخل دیگ را نشان می‌دهد. مونوکسید کربن به دلیل تأمین هوا توسط نازل‌های هوای ثانویه تقریباً به‌طور کامل به دی‌اکسید کربن اکسید می‌شود. به‌این‌ترتیب انرژی کمی در اثر احتراق ناقص از دست می‌رود. لازم به ذکر است که احتراق ناقص مربوط به طراحی دیگ بخار و نسبت هوای اضافی مورداستفاده در فرآیند احتراق است. بااین‌حال، اختلاط گازها با هوای احتراق می‌تواند بهبود یابد اگر یک نازل در دیوار سمت چپ در همان ارتفاع نازل اول در دیوار سمت راست قرار گیرد(Silva et al., 2017).



شکل ۸: نسبت جرمی کربن دی‌اکسید



شکل ۹: نسبت جرمی کربن مونواکسید

نتایج به‌دست‌آمده از این پروژه آنالیز CFD از یک دیگ بخار با سوخت زیست‌توده است و روش توسعه‌یافته برای مدل‌سازی احتراق در یک دیگ بخار گزارش‌شده است. برای مطالعه عملکرد یک دیگ بخار با سوخت زیست‌توده، دامنه به دو ناحیه اصلی تقسیم می‌شود: بستر ثابت و بستر متحرک. از نرم‌افزار ANSYS Fluent برای شبیه‌سازی بستر متحرک استفاده می‌شود و یک مدل تجربی برای حل و تجزیه حرارتی زیست‌توده در بستر و تعیین شرایط مرزی مورداستفاده در نرم‌افزار استفاده می‌شود(Silva et al., 2017).

نتایج نشان می‌دهد که مکانیسم احتراق کلی به‌طور منطقی انتشار مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن را در داخل دیگ پیش‌بینی می کند. بااین‌حال، در داخل دیگ، اختلاط گازها با هوای احتراق را می‌توان از طریق افزایش نرخ جریان هوای ثانویه یا تزریق هوای ثالث بالاتر در دیگ بهبود بخشید(Silva et al., 2017).

نتیجه‌گیری

مدل‌سازی عددی به‌عنوان یک مسیر مهم برای مطالعه رفتار گازیفایر به‌منظور بهینه‌سازی طراحی و عملکرد آن در مقایسه با آزمایش‌های فیزیکی که هم زمان‌بر و هم غیراقتصادی است، عمل می‌کند. به طوری که، برای راه‌اندازی یک گازیفایر در مکانی معین، اگر خوراک پیشنهادی در دسترس نباشد، گازیفایر باید بر روی مواد اولیه در دسترس اجرا شود تا بهترین خوراک برای گازیفایر مشخص شود. به طوری که با بررسی مدل های عددی نتایج زیر حاصل شد.

- با استفاده از مدل عددی و بامطالعه خروجی مدل مطابق با ویژگی‌های خوراک موجود، می توان ماده اولیه و خروجی های بهینه‌ای را بدست اورد.
- مدل‌های عددی به‌گونه‌ای فرمول‌بندی می‌شوند که نمایش خوبی از پدیده‌های شیمیایی و فیزیکی که در داخل گازساز رخ می دهند ارائه می دهند.
- مدل‌سازی تعادلی و مدل‌سازی جنبشی رویکردهایی هستند که بیشتر در مطالعه گازی‌سازی زیست‌توده مورداستفاده قرار می‌گیرند. به طوری که CFD به‌عنوان یک روش مهم برای مطالعه رفتار و طراحی گازیفایر با شرایط مختلف محسوب می‌گردد. بااین‌حال، بررسی دقیق فرآیند تبدیل به گاز همراه با روش‌های عددی دقیق برای جریان چند فازی و نیز به‌منظور توسعه یک شبیه‌سازی جامع CFD امری ضروری است.
- نرم‌افزار ANSYS FLUENT یک روش ویژه برای مدل سازی انتقال گرما و جرم بین فازهای جامد و گاز استفاده می شود و مدلی از تراکم در نواحی احتراق بستر پیشنهاد شده است.
- با استفاده از نتایج شبیه سازی، می توان پارامترهایی مانند نرخ احتراق، حداکثر درجه حرارت، ضخامت جبهه های خشک شدن، تبخیر و مصرف زغال برای مقایسه شبیه سازی ها و آزمایش ها را بدست آورد.

مراجع:

Babu, B., & Sheth, P. N. (2006). Modeling and simulation of reduction zone of downdraft biomass gasifier: effect of char reactivity factor. *Energy Conversion and Management*, *47*(15-16), 2602-2611.

Basu, P. (2006). *Combustion and gasification in fluidized beds*. CRC press.

Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Academic press.

Bhuiyan, A. A., Karim, M. R., & Naser, J. (2016). Modeling of solid and bio-fuel combustion technologies. In *Thermofluid Modeling for Energy Efficiency Applications* (pp. 259-309). Elsevier.

Bhuiyan, A. A., & Naser, J. (2015). Computational modelling of co-firing of biomass with coal under oxy-fuel condition in a small scale furnace. *Fuel*, *143*, 455-466.

Centeno-González, F. O., Silva Lora, E. E., Villa Nova, H. F., Mendes Neto, L. J., Martínez Reyes, A. M., Ratner, A., & Ghamari, M. (2017). CFD modeling of combustion of sugarcane bagasse in an industrial boiler. *Fuel*, *193*, 31-38. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.105

Gómez, M., Porteiro, J., Patiño, D., & Míguez, J. (2014). CFD modelling of thermal conversion and packed bed compaction in biomass combustion. *Fuel*, *117*, 716-732.

Gungor, A. (2011). Modeling the effects of the operational parameters on H2 composition in a biomass fluidized bed gasifier. *International Journal of Hydrogen Energy*, *36*(11), 6592-6600.

Karim, M. R., & Akhanda, M. (2011). Study of a hybrid photovoltaic thermal (PVT) solar systems using different ribbed surfaces opposite to absorber plate. *Journal of Engineering and Technology (JET)*, *9*(01).

Kivisaari, T., Björnbom, P., Sylwan, C., Jacquinot, B., Jansen, D., & de Groot, A. (2004). The feasibility of a coal gasifier combined with a high-temperature fuel cell. *Chemical Engineering Journal*, *100*(1-3), 167-180.

Mandal, S., Sarker, M., Rahman, M. S., & Beg, M. (2017). Numerical study of a downdraft gasifier to produce syngas. AIP Conference Proceedings,

Mätzing, H., Gehrmann, H.-J., Seifert, H., & Stapf, D. (2018). Modelling grate combustion of biomass and low rank fuels with CFD application. *Waste management*, *78*, 686-697.

Pandey, B., Prajapati, Y. K., & Sheth, P. N. (2021). CFD analysis of biomass gasification using downdraft gasifier. *Materials Today: Proceedings*, *44*, 4107-4111.

Pepiot, P., Dibble, C., & Foust, T. (2010). Computational fluid dynamics modeling of biomass gasification and pyrolysis. In *Computational modeling in lignocellulosic biofuel production* (pp. 273-298). ACS Publications.

Puig-Arnavat, M., Bruno, J. C., & Coronas, A. (2010). Review and analysis of biomass gasification models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(9), 2841-2851.

Scharler, R., Benesch, C., Neudeck, A., & Obernberger, I. (2009). CFD based design and optimisation of wood log fired stoves. 17th European Biomass Conference,

Sharma, A. K. (2011). Experimental investigations on a 20 kWe, solid biomass gasification system. *Biomass and bioenergy*, *35*(1), 421-428.

Silva, J., Teixeira, J., Teixeira, S., Preziati, S., & Cassiano, J. (2017). CFD modeling of combustion in biomass furnace. *Energy Procedia*, *120*, 665-672.

Sreejith, C., Muraleedharan, C., & Arun, P. (2013). Performance prediction of fluidised bed gasification of biomass using experimental data-based simulation models. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *3*(4), 283-304.

Ström, H., & Thunman, H. (2013). CFD simulations of biofuel bed conversion: A submodel for the drying and devolatilization of thermally thick wood particles. *Combustion and flame*, *160*(2), 417-431.

Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R. W., & Warnatz, J. (2006). *Combustion*. Springer.

Xie, J., Zhong, W., Jin, B., Shao, Y., & Liu, H. (2012). Simulation on gasification of forestry residues in fluidized beds by Eulerian–Lagrangian approach. *Bioresource technology*, *121*, 36-46.

Yin, C., Rosendahl, L. A., & Kær, S. K. (2008). Grate-firing of biomass for heat and power production. *Progress in Energy and combustion Science*, *34*(6), 725-754.

International Energy Agency.Good practice guide lines: bioenergy project development and biomass supply.France,OECD/IEA;2007.

Numerical simulation of combustion in stoves with biomass fuel

Hamed Asadi[1], Mohammad hossein Abbaspour-Fard[2*], Mohammad Ali Ebrahimi Nik[3], Javad Zarei[4]

1. Msc. student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
2. Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
3. Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
4. Instructor of Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Abstract

Biomass is being considered as one of the important source of energy production in the world. Among the various routes available for biomass based energy production, biomass gasification is being studied extensively. Biomass gasification is a thermochemical conversion process of biomass materials inside a reactor. A number of interrelated parameters including the type of fuel, the reactor design and operating parameters affect gasifier performance. With the help of numerical modeling, it is possible to determine the optimal conditions for a reactor with certain characteristics without conducting experimental tests, which are time consuming and mostly expensive. In this research, it has been tried to categorize the performed modeling based on specific criteria such as type of gasifier, feedstock, modeling considerations and evaluated parameters, in order to finally make comparative evaluations of modeling techniques and output for each category of the models. ANSYS FLUENT software is a more suitable method for simulating biomass combustion in monolithic and fluidized beds, which is tested with a flame simulator, measuring different flow rates in the range of stable combustion. Also, various researches in this field showed that the appropriate model for investigating combustion is the k-ε model and the Eddy-Dissipation model for investigating the pollutants at the stove outlet.

Key words: Simulation, computational fluid dynamics, combustion, stove, biomass

*Corresponding author
E-mail: hamed.asadi@mail.um.ac.ir