

## بررسی عددی تأثیر محتوای رطوبت، قطر ذره و دبی جرمی سوخت بر احتراق سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی پالایشگاهی

سولماز فرح وشی<sup>۱</sup> و سبحان امامی کوپائی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، s\_farahvashi@yahoo.com

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، sobhan@pmc.iaun.ac.ir

\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۹، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۷/۴/۹، پذیرش: ۹۷/۶/۱۰)

**چکیده:** سالانه مقدار زیادی لجن نفتی حین بهره‌برداری و فعالیت‌های فرایندی بر روی نفت خام تولید می‌شود. سوزاندن لجن نفتی در راستای بازیافت انرژی موجود در آن و همچنین به‌عنوان راه‌کاری جهت مدیریت این پسماند خطرناک می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی عددی احتراق سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی پالایشگاهی در یک کوره دو بعدی دارای تقارن محوری انجام شده است. بررسی تأثیر قطر ذرات سوخت بر فرایند احتراق نشان داد با افزایش قطر ذرات از  $5 \times 10^{-5}$  m تا  $6 \times 10^{-4}$  m، مقدار بیشینه دما حدود ۱۴ درصد کاهش می‌یابد و مکان بیشینه دما نیز ۴۰ cm از ورودی کوره دورتر می‌شود. به‌منظور بررسی اثر میزان آب‌گیری از لجن نفتی پالایشگاهی بر خواص احتراقی سوخت، مطالعه‌ای بر روی اثر میزان محتوای رطوبت سوخت انجام گرفت. نتایج حاضر نشان داد افزایش ۳۰ درصدی جرم رطوبت در آنالیز تقریبی سوخت، مقدار بیشینه دما را در حدود ۱۱ درصد کاهش می‌دهد. همچنین، تأثیر میزان دبی جرمی سوخت ورودی در بازه  $0.15$  gr/s تا  $0.29$  gr/s بررسی شد. در بازه مورد بررسی کاهش دبی سوخت تأثیر قابل توجهی بر بیشینه دمای گازهای احتراق نداشته، در حالی که میزان انتشار گازهای CO و CO<sub>2</sub> به‌نحو مطلوبی کاهش می‌یابد. در نهایت، نتایج حاصل از احتراق سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی نشان داد با انجام آماده‌سازی سوخت نظیر کاهش رطوبت و استفاده از ذرات با قطر کوچک‌تر می‌توان نتایج قابل قبولی به‌دست آورد و از ارزش حرارتی لجن نفتی به‌نحو مطلوبی استفاده کرد.

**کلیدواژه‌گان:** لجن نفتی پالایشگاهی، احتراق سوخت جامد پودر شده، قطر ذرات، محتوای رطوبت، دبی جرمی سوخت ورودی

### مقدمه

همواره، در حین مراحل مختلف تولید، پالایش و بهره‌برداری نفت خام، حجم زیادی ضایعات نفتی که از آن به‌عنوان لجن نفتی<sup>۱</sup> یاد می‌شود، در کشور تولید می‌شود. عمده لجن‌های نفتی از ته‌نشینی هیدروکربن‌های سنگین موجود در فرآورده‌ی نفتی به‌همراه سایر ذرات جامد معلق مانند نمک و گل‌ولای حفاری در کف مخازن نفتی حاصل می‌شوند [۱].

این لجن‌ها بر حسب نوع و کیفیت فرآورده نفتی، مدت زمان ذخیره‌سازی، دمای محیط و فرآورده نفتی و همچنین تعداد دفعات پر و خالی شدن مخزن، دارای آنالیزهای متفاوتی اند [۱-۲]. به‌طور کلی، لجن‌های نفتی شامل سه جزء آب، روغن (شامل نفتالین‌ها، پارافین‌ها و آسفالت‌ها) و مواد جامدند. این لجن‌ها خطری بالقوه برای محیط زیست به‌شمار آمده و باید به‌نحو مناسبی امحاء شوند [۲]. مدیریت و امحای لجن نفتی از چالش‌های اصلی صنایع نفت به‌شمار می‌رود. آمارهای جهانی نشان می‌دهند که سالانه در حدود ۶۰ میلیون تن لجن نفتی تولید می‌شود و تقریباً یک میلیون تن آن در سراسر جهان انباشته شده

1. Oil Sludge

است [۱]. هر سال بخش عظیمی از بودجه صنایع نفت به مدیریت و امحای پسماند لجن نفتی اختصاص می‌یابد. در این خصوص، روش‌های متداولی نظیر دفن در خاک، تصفیه بیولوژیکی و سوزاندن به کار برده می‌شوند. دفن کردن از روش‌های سریع و آسان به‌شمار می‌آید، ولی در این صورت، به‌دلیل وجود مواد سمی موجود در لجن نفتی، عوارض ثانویه دیگری نظیر آلودگی خاک و سفره‌های آب زیرزمینی ایجاد می‌شود. علی‌رغم مزایای روش تصفیه بیولوژیکی، این روش نیز به‌دلیل نرخ پایین تصفیه و زمان‌بر بودن، کاربرد نکرده است [۳]. سوزاندن از گذشته یکی از راهکارهای امحاء انواع پسماند به‌شمار می‌رود [۴-۶]. با توجه به وجود حجم زیاد مواد قابل اشتعال در لجن نفتی، سوزاندن آن نه‌تنها باعث کم‌شدن حجم آن می‌شود، بلکه بازیافت انرژی را نیز به‌دنبال دارد.

احتراق سوخت‌های جامد با ارزش حرارتی پایین (مانند سوخت مشتق‌شده از لجن نفتی (SODF)<sup>۱</sup>) چالش‌هایی را از لحاظ حجم کوره، طراحی کوره و نحوه هوادهی به‌همراه دارند که باید مورد بررسی و تحقیق قرار گیرد. این در حالی است که اکثر تحقیقات انجام‌شده در حوزه احتراق سوخت‌های جامد، بر روی احتراق زغال‌سنگ یا احتراق هم‌زمان زغال‌سنگ با سایر سوخت‌های جامد متمرکز بوده است. در بیشتر موارد، احتراق هم‌زمان به کاهش آلاینده‌ها در خروجی کوره منجر شده است [۷-۸]. به‌عنوان نمونه، احتراق هم‌زمان زغال‌سنگ با درصد‌های متفاوتی از ضایعات جامد شهری<sup>۲</sup> (MSW) توسط لو و همکاران [۹] به‌صورت عددی بررسی شد. در اغلب موارد، افزودن MSW به زغال‌سنگ کاهش انتشار آلاینده‌ها را به‌همراه داشت. وبر و همکاران [۱۰] مقایسه‌ای بین سوخت مشتق‌شده از ضایعات<sup>۳</sup> (RDF) و زغال‌سنگ انجام دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد زغال‌سنگ پودر شده در طول کوتاه‌تری از کوره مشتعل شده و احتراق آن در ۳۰۰ ms کامل می‌شود. این در حالی است که حجم بالای مواد فرار موجود در RDF سبب می‌شود که احتراق آن در فاصله دورتری اتفاق بیفتد، به‌طوری‌که بعد از گذشت ۱/۸ s تنها ۹۴٪ احتراق کامل می‌شود. قطر ذرات سوخت نیز عامل مهمی در فرایند احتراق است [۱۱]. لیاکوس و همکاران [۱۲] نشان دادند با افزایش قطر ذرات زغال‌سنگ، نرخ نفوذ، نرخ احتراق را کنترل کرده و در این صورت دما در تمام کوره کاهش می‌یابد. الفاساخانی و همکاران [۱۳] نشان دادند اگر اندازه ذرات بزرگ باشد یا سرعت جریان زیاد باشد واکنش‌های اکسیداسیون به‌سمت خروجی کوره نزدیک می‌شوند؛ از این رو اکسیداسیون ناقص رخ می‌دهد. ما و همکاران [۱۴] نیز با شبیه‌سازی احتراق ذرات زیست‌توده پودر شده (چوب) نشان دادند که در ذرات بزرگ از تغییرات دمایی درون ذرات نمی‌توان صرف‌نظر کرد، در حالی‌که برای ذرات تا قطر متوسط ۰/۳۳ mm تغییرات دمایی درون ذرات تأثیر قابل توجهی ندارد و قابل صرف‌نظر کردن است. این موضوع در تحقیق یین و همکاران [۱۵] نیز بررسی و تأیید شد. آگرانوس و همکاران [۱۶] احتراق هم‌زمان سوخت‌های جامد بازیافتی<sup>۴</sup> (SRF) و زغال‌سنگ را شبیه‌سازی کردند و ضرایب سینتیک تک‌نرخی و سنتیک نفوذ را به‌ترتیب برای آزاد شدن گازهای فرار و احتراق مواد نیم‌سوز تعیین کردند. آن‌ها بیان کردند درصد مواد نسوخته، با افزایش قطر ذرات، افزایش می‌یابد و علت این امر کافی نبودن زمان ماند (زمان اقامت) برای ذرات با قطر بزرگ‌تر است. یین و همکاران [۱۷] به‌صورت عددی احتراق هم‌زمان کاه با زغال‌سنگ را در مشعل چرخشی پایدارشونده بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که به‌دلیل وجود مواد فرار بیشتر در کاه و همچنین تنوع در اندازه و شکل ذرات کاه، شعله با حجم بزرگ‌تری ایجاد می‌شود. کاردگر [۱۸] نیز احتراق ذرات سوخت مشتق‌شده از زباله را به‌صورت عددی بررسی کرد و نشان داد با افزایش قطر ذرات RDF بیشینه دما کاهش یافته و ناحیه دمابالا از ورودی کوره فاصله می‌گیرد. علت این امر کاهش نرخ آزاد شدن گازهای فرار و همچنین افزایش زمان مورد نیاز برای احتراق واکنش غیرهمگن کربن است. بویان و ناصر [۸] با مطالعه عددی احتراق تحت اکسیژن زیست‌توده و زغال‌سنگ نشان دادند که با افزایش سهم زیست‌توده، حجم شعله افزایش می‌یابد که این به‌دلیل افزایش شار حرارتی ناشی از آزاد شدن گازهای فرار بیشتر است. از سوی دیگر، با افزایش سهم زیست‌توده، میزان رطوبت افزایش

1. Sludge Oil Derived Fuel  
2. Municipal solid waste  
3. Refuse derived fuel  
4. Solid recovered fuels

ارزش حرارتی کمتر خواهد شد که این امر موجب کاهش دمای بیشینه می‌شود؛ بنابراین شار انتقال حرارت تشعشی نیز کاهش می‌یابد.

در زمینه احتراق سوخت‌های جامد، مطالعاتی نیز در مورد اثر شکل ذرات بر پارامترهای احتراقی انجام شده است. لو و همکاران [۱۹] از سه شکل ذرات زیست‌توده تخت، استوانه‌ای و کروی در آزمایش و مدل‌سازی خود استفاده کردند. آن‌ها دریافتند، با افزایش نسبت منطری<sup>۱</sup> ذرات، میزان انتقال جرم و حرارت در مرزها افزایش می‌یابد و نرخ تبدیل بیشتر می‌شود. به همین دلیل زمان ماند برای ذرات غیرکروی کمتر از ذرات کروی است. بنفاسیس و همکاران [۲۰] ذرات زیست‌توده را به صورت استوانه‌ای شبیه‌سازی کردند و ثابت کردند که مدل آن‌ها برای پیش‌بینی غلظت مونواکسید کربن (CO) و مونواکسید نیتروژن (NO) در گازهای خروجی، نسبت به مدل‌هایی که ذرات را به صورت کروی توصیف می‌کنند، دقیق‌تر است. گابا و همکاران [۲۱-۲۲] نیز اثر شکل ذرات و گرادیان‌های دمایی داخلی ذرات زیست‌توده را در شعله‌های احتراق هم‌زمان زغال‌سنگ پودر شده و زیست‌توده بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که فرض کروی بودن ذرات، فرایندهای احتراقی را به تاخیر می‌اندازد و زمان ماند را افزایش می‌دهد.

در خصوص بررسی خواص شعله لجن نفتی، کارهای انجام‌شده بسیار محدود بوده و تنها به مطالعات تجربی محدود است. زو و همکاران [۲۳] احتراق لجن نفتی را در یک کوره بستر سیالی چرخان<sup>۲</sup> به صورت تجربی مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند که دمای بستر اثر زیادی بر روی میزان آزادسازی مواد فرار لجن نفتی دارد. لیو و همکاران [۲۴] نیز احتراق هم‌زمان لجن نفتی با زغال‌سنگ را در یک کوره بستر سیالی چرخان به صورت تجربی مطالعه کردند. نتایج نشان داد که احتراق هم‌زمان لجن نفتی با زغال‌سنگ خواص عملکردی خوبی به همراه دارد. انتشار آلاینده‌ها در محدوده مقررات زیست‌محیطی چین قرار داشت و آنالیز فلزات سنگین در خاکستر ته‌نشین شده نشان داد که خاکسترهای احتراقی می‌توانند به عنوان خاک زراعی استفاده شوند. هو و همکاران [۲۵] نیز خواص احتراقی چهار نوع سوخت مشتق‌شده از لجن نفتی با ترکیبات مختلف را آزمایش کردند. نتایج نشان داد ارزش حرارتی لجن نفتی برای استفاده به عنوان یک سوخت RDF مناسب است و هرچه میزان لجن نفتی بیشتر می‌شود، RDF سخت‌تر می‌سوزد.

از آنجایی که استفاده از سوخت‌هایی با ارزش حرارتی پایین نظیر سوخت مشتق‌شده از لجن نفتی (SODF) از چالش‌های پیش‌روی سیستم‌های احتراقی است، در تحقیق حاضر، به بررسی امکان استفاده از لجن نفتی به عنوان سوخت جامد در یک کوره مشخص پرداخته می‌شود. این کوره در تحقیق آگرانوس و همکاران [۲۶] معرفی شده است. در این راستا، با استفاده از شبیه‌سازی عددی تأثیر قطر ذرات، محتوای رطوبت و دبی جرمی سوخت بر خواص احتراقی SODF بررسی می‌شود. به منظور ارزیابی امکان جایگزینی SODF با سوخت‌های جامد متداول در کوره‌های سوخت جامد، خواص احتراقی SODF با سایر سوخت‌های جامد نظیر زغال‌سنگ و زیست‌توده مقایسه می‌شود. در نهایت نیز، می‌توان در خصوص احتراق SODF به عنوان یک راهکار زیست‌محیطی جهت مدیریت این نوع پسماند اظهار نظر کرد.

## معادلات حاکم و روش حل عددی

از آنجایی که در احتراق سوخت‌های جامد از جمله SODF جریان دوفازی حاکم است، برای مدل‌سازی فاز پیوسته یا جریان سیال از دیدگاه اولیری و برای مدل‌سازی فاز گسسته یا ذرات از دیدگاه لاگرانژی استفاده می‌شود. معادلات حاکم بر جریان سیال آشفته واکنشی داخل محفظه احتراق از معادلات بقای جرم، تکانه، بقای انرژی و گونه‌ها تشکیل شده که با استفاده از رویکرد معادلات متوسط‌گیری شده زمانی ناویر استوکس<sup>۳</sup> (RANS) به دست می‌آیند. برای پیش‌بینی لرزت گردابه‌ای آشفته که

1. Aspect ratio  
2. Circulating fluidized bed  
3. Reynolds averaged Navier-Stokes

در معادله تکانه متوسط‌گیری شده ظاهر می‌شود، از مدل آشفستگی  $k-\varepsilon$  استاندارد استفاده می‌شود. از آنجایی که اهمیت در نظر گرفتن انتقال حرارت تشعشی در مدل‌سازی احتراق سوخت جامد توسط محققان مختلفی [۲۷، ۱۸] مورد تأکید قرار گرفته، در کار حاضر برای مدل‌سازی تشعشع روش جهات مجزا<sup>۱</sup> (DO) انتخاب شده و برای محاسبه ضریب جذب گازهای احتراقی از مدل توزیع وزنی مجموع گازهای خاکستری<sup>۲</sup> (WSGGM) استفاده شده است. مسیر حرکت ذره با حل معادله تکانه به دست می‌آید. در این معادله، نیروهای حجمی، پسا و ثقل منظور شده و برای محاسبه ضریب پسا، ذرات به صورت کروی فرض می‌شوند. برای بررسی اثر جریان آشفته بر حرکت ذرات نیز از مدل حرکت تصادفی مجزا<sup>۳</sup> (DRW) استفاده می‌شود [۲۸]. از آنجایی که کسر حجمی ذرات جامد در کار حاضر بسیار کوچک است (فرض جریان رقیق)، از اندرکنش دوراهاه بین فازهای پیوسته و مجزا و همچنین از اندرکنش ذره-ذره صرف نظر شده است [۱۶]. از آنجایی که تاکنون سازوکاری برای تحلیل احتراق لجن نفتی ارائه نشده است، در این تحقیق، از سازوکار پیشنهاد شده برای احتراق زغال سنگ استفاده می‌شود. در این حالت معادلات انتقال حرارت و جرم برای ذره شامل شش مرحله‌اند [۱۶]: ۱- گرم شدن، ۲- تبخیر رطوبت، ۳- جوشش رطوبت، ۴- آزاد شدن و احتراق مواد فرار، ۵- سوختن مواد نیم‌سوز و ۶- سرد شدن ذره که در ادامه توضیح داده می‌شوند.

### گرم شدن و سرد شدن ذره

با ورود ذره به کوره دمای آن افزایش می‌یابد. این افزایش دما تا رسیدن دمای ذره به دمای جوش ادامه می‌یابد. سرد شدن ذره نیز پس از احتراق کلیه مواد قابل احتراق موجود در ذره و باقی ماندن خاکستر اتفاق می‌افتد. در این دو مرحله، هیچ گونه انتقال جرمی صورت نمی‌گیرد و ذره با مکانیزم‌های انتقال حرارت هدایت، جابه‌جایی و تشعشع با محیط پیرامونش تبادل گرما دارد. به دلیل کوچک بودن قطر ذرات و با فرض سیستم فشرده<sup>۴</sup> (از آنجایی که عدد بیو<sup>۵</sup> کمتر از ۰٫۱ است) از انتقال حرارت درون ذرات صرف نظر می‌شود. در این صورت معادله انتقال حرارت برای ذره را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (1)$$

که  $m_p$  جرم ذره،  $c_p$  ظرفیت حرارتی ذره،  $A_p$  مساحت سطح ذره،  $T_p$  دمای ذره،  $T_\infty$  دمای فاز پیوسته،  $\varepsilon_p$  ضریب صدور ذره،  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن و  $\theta_R$  دمای تشعشع است. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی  $h$  نیز با استفاده از رابطه رانز-مارشال<sup>۶</sup> به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Nu = \frac{h d_p}{K_\infty} = 2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr^{1/3} \quad (2)$$

به طوری که  $K_\infty$  ضریب انتقال حرارت هدایت فاز پیوسته،  $Pr$  عدد پراتل و  $Re_d$  عدد رینولدز به دست آمده بر اساس قطر و سرعت ذره است. تأکید این نکته لازم است که در مرحله گرم شدن ذره هیچ گونه انتقال جرمی رخ نداده و تبخیر رطوبت و آزاد شدن گازهای فرار انجام نمی‌شود [۲۹]. از این رو فرض می‌شود که در مجاورت سطح ذره تنها فاز پیوسته وجود دارد.

### تبخیر و جوشش رطوبت

زمانی که دمای ذره به دمای تبخیر،  $T_{vap}$  می‌رسد، فرایند تبخیر رطوبت آغاز شده و تا زمانی که دمای ذره به دمای جوشش،  $T_{bp}$  برسد یا تمام رطوبت تبخیر شود ادامه می‌یابد. مقدار شار بخار ذراتی که وارد فاز گاز می‌شود به گرادیان غلظت بخار بین سطح ذره و گاز بستگی دارد [۱۶]:

1. Discrete ordinates  
2. The weighted-sum-of-gray-gases model  
3. Discrete random walk model  
4. Lumped system  
5. Biot number  
6. Ranz-Marshall

$$N_i = k_c(C_{i,s} - C_{i,\infty}) \quad (3)$$

که  $N_i$  شار مولی بخار،  $k_c$  ضریب انتقال جرم و  $C_{i,s}$  غلظت بخار بر روی سطح ذره است که با فرض برابری فشار جزئی بخار در سطح مشترک با فشار اشباع بخار در دمای ذره به دست می آید. همچنین،  $C_{i,\infty}$  غلظت بخار در گاز است که با حل معادله موازنه گونه‌ها برای گونه  $i$  قابل محاسبه است. همچنین، ضریب انتقال جرم به صورت زیر از رابطه عدد شروود<sup>۱</sup> محاسبه می شود.

$$Sh = \frac{k_c d_p}{D_{i,m}} = 2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3} \quad (4)$$

که  $D_{i,m}$  ضریب نفوذ بخار در توده سیال و  $Sc$  عدد اشمیت<sup>۲</sup> است. جرم ذره نیز با مرور زمان براساس رابطه زیر کاهش می یابد:

$$m_{p(t+\Delta t)} = m_p(t) - N_i A_p M_{w,i} \Delta t \quad (5)$$

که  $M_{w,i}$  جرم مولکولی گونه  $i$  است.

در نهایت، دمای ذره که تحت تأثیر مکانیزم‌های انتقال حرارت جابه جایی، انتقال حرارت ناشی از تبخیر آب و انتقال حرارت تشعشی قرار دارد از موازنه حرارتی زیر به دست می آید [۱۶]:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) - \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + A_p \epsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (6)$$

به طوری که  $h_{fg}$  گرمای نهان تبخیر آب و  $dT_p/dt$  نرخ تبخیر است.

جوشش رطوبت موجود در ذره هنگامی اتفاق می افتد که دمای ذره به دمای جوشش برسد. در این حالت جوشش همرفتی فاز مجزا از معادله زیر محاسبه می شود:

$$\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{4k_\infty}{\rho_p c_{p,\infty} d_p} (1 + 0.23 \sqrt{Re_d}) \ln \left[ 1 + \frac{c_{p,\infty} (T_\infty - T_p)}{h_{fg}} \right] \quad (7)$$

به طوری که  $\rho_p$  چگالی قطره،  $c_{p,\infty}$  ظرفیت حرارتی گاز و  $k_\infty$  ضریب هدایت حرارتی گاز است. در حین جوشش فرض می شود دمای قطره ثابت است. گرمای لازم برای تبخیر رطوبت به صورت منفی در معادله انرژی فاز پیوسته ظاهر می شود.

### آزادشدن و احتراق گازهای فرار

آزادشدن گازهای فرار زمانی اتفاق می افتد که دمای ذرات از دمای تبخیر بالاتر رفته و جرم ذره از جرم مواد غیرفرار بیشتر می شود. گازهای فرار ترکیبی از گازهای  $H_2$ ،  $C_3H_8$ ،  $CH_4$ ،  $CO$ ،  $CO_2$  و گازهای غیرارگانیک دیگر است که از ذرات سوخت جامد آزاد می شوند [۳۰]. آزادشدن گازهای فرار فرایند پیچیده‌ای است که به پارامترهای زیادی مانند نوع سوخت، دما، فشار، نرخ حرارت دادن، اندازه ذرات، سرعت فاز پیوسته، ظرفیت حرارتی و میزان اکسیژن و مواد فرار موجود در سوخت بستگی دارد. در این تحقیق، با توجه به عدم اطلاع از ساختار مولکولی و شیمیایی لجن نفتی از مدل تجربی سینتیک تک‌نرخی، که برای آزادشدن گازهای فرار زغال سنگ ارائه شده است، استفاده می شود. این مدل پیش تر نیز برای شبیه سازی احتراق زیست توده ها و سایر سوخت های جامد مانند RDF و SRF استفاده شده است [۱۶-۲۱، ۱۸]. در این مدل، فرض می شود نرخ آزادشدن گازهای فرار از مرتبه اول است و مطابق رابطه (۸) با میزان گازهای فرار موجود در ذره ارتباط دارد [۲۰]:

$$-\frac{dm_p}{dt} = k [m_p - (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0}] \quad (8)$$

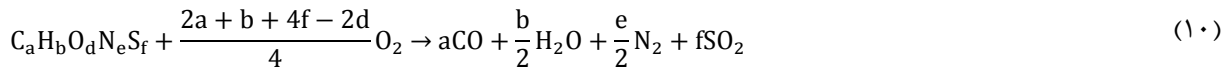
در این رابطه،  $k$  نرخ سینتیک است و مطابق رابطه آرنیوسی زیر به دما مربوط می شود:

$$k = A_1 e^{-\left(\frac{E}{RT}\right)} \quad (9)$$

به طوری که  $R$  ثابت جهانی گازها،  $E$  ضریب انرژی فعال سازی و  $A_1$  ضریب پیش نمایی است.

1. Sherwood number  
2. Schmidt number

از آنجايى كه تركيب دقيق گازهاى فرار آزاد شده از لجن نفتى در دسترس نيست، اين گازها به صورت يك گونه مصنوعى  $C_aH_bO_dN_eS_f$  در نظر گرفته مى شوند. ضرائب  $a, b, d, e, f$  از آناليز نهايى و تقريبي سوخت به دست مى آيند. همچنين، براى شبیه سازی احتراق گازهاى فرار از واكنش دومرحله اى زير استفاده مى شود [31]:



به دليل عدم وجود مكانيزم شيميايى براى گونه مصنوعى بالا مى توان با فرض شيمى سريع از تأثير سينتيك شيميايى صرف نظر كرد و از مدل اضمحلال گردابه ها<sup>1</sup> (EDM)، كه براى اين منظور ارائه شده است، براى مدل سازی احتراق استفاده كرد.

### احتراق مواد نيم سوز

با اتمام فرايند آزاد شدن گازهاى فرار، مواد نيم سوز كه از كربن و خاكستر تشكيل شده و داراى سطح متخلخل اند باقى مى مانند. در اين زمان، مواد نيم سوز شروع به انجام واكنش هاى سطحى با گازهاى اكسيدكننده پيرامون خود نظير  $O_2$  مى كنند. اين واكنش ها تا زمان سوختن تمام مواد قابل احتراق،  $f_{comb}$  ادامه مى يابند. واكنش ناهمگن مواد نيم سوز را مى توان به صورت زير در نظر گرفت [28]:



در اين رابطه،  $S_b$  ميزان جرم اكسيدكننده در واحد جرم مواد نيم سوز است.

دو عامل اصلى نرخ انجام واكنش ميان اكسيدكننده و مواد نيم سوز را كنترل مى كند: نفوذ اكسيدكننده به سطح ذره و سينتيك احتراق. به همين دليل، در اين تحقيق، از مدل سينتيك-نفوذ<sup>2</sup> استفاده مى شود. در اين مدل فرض مى شود واكنش سطحى توسط هر دو عامل نفوذ اكسيدكننده و نرخ سينتيك كنترل مى شود:

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p p_{ox} \frac{D_o R}{D_o + R} \quad (13)$$

در رابطه (13)،  $A_p$  مساحت سطح ذره و برابر با  $\pi d_p^2$  و  $p_{ox}$  فشار جزئى گونه هاى اكسيدكننده در گاز اطراف ذرات احتراقى است. ضريب نرخ نفوذ اكسيدكننده،  $D_o$  و نرخ سينتيك واكنش سطحى،  $R$  نيز به صورت زير محاسبه مى شوند [29]:

$$D_o = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0.75}}{d_p} \quad (14)$$

$$R = C_2 e^{-(E/RT_p)} \quad (15)$$

كه ضرائب  $C_1, C_2$  و  $E$  براى سوخت زيست توده در جدول 1 داده شده اند.

جدول 1- ضرائب معادلات تبخير مواد فرار و احتراق مواد نيم سوز براى سوخت زيست توده [26]

Table 1- Value of coefficients of devolatilization and combustion of char combustion for biomass fuels [26]

Char combustion		Devolatilization	
$C_1$	$5 \times 10^{-12}$	$A_1$	$3.15 \times 10^5$
$C_2$	6.7	$E(J/kg.mol)$	$7.4 \times 10^7$
$E(J/kg.mol)$	$1.138 \times 10^8$		

### هندسه مسئله و روش حل عددى

هندسه كوره مورد مطالعه در اين تحقيق، هندسه استفاده شده در تحقيق آگرايوس [26] است كه ابعاد و جزئيات آن در شكل 1 نشان داده شده است.

1. Eddy dissipation model  
2. The kinetic/diffusion surface reaction rate model

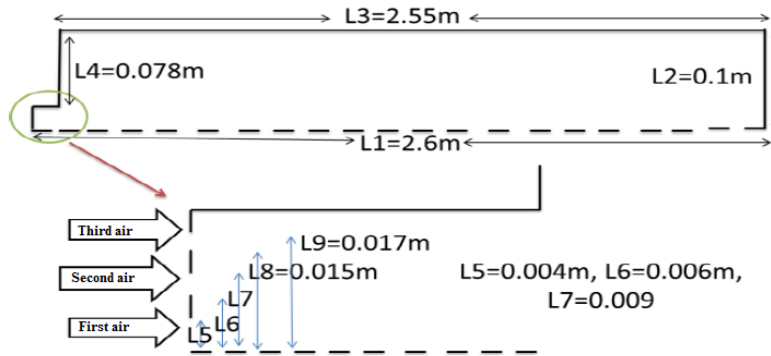


Figure 1- The dimensions and details of the furnace [26]  
 شکل ۱- ابعاد کوره مورد مطالعه و جزئیات آن [۲۶]

مدل سازی کوره به صورت دوبعدی با تقارن محوری انجام شده است. این محفظه دارای سه ورودی است که از ورودی اول سوخت و هوا و از دو ورودی دیگر فقط هوا وارد می شود. شرایط هوای ورودی در جدول ۲ آورده شده است. از شرط عدم لغزش برای سرعت بر روی دیواره ها استفاده شده و دمای دیواره ها در  $1300^{\circ}\text{C}$  ثابت نگه داشته شده است.

جدول ۲- شرایط هوای ورودی به کوره [۲۶]

Table 2- Initial Conditions of air entering the furnace [26]

$U_1$ (m/s)	8.366
$U_2$ (m/s)	4.475
$U_3$ (m/s)	3.093
$T_{1,2,3}$ (K)	373

برای حل مشکل جفت شدگی میدان های فشار و سرعت نیز از روش سیمپل<sup>۱</sup> استفاده می شود. در همه شبیه سازی ها از روش پادبادسو<sup>۲</sup> مرتبه دوم برای گسسته سازی جملات جابه جایی بهره برده شده است.

## نتایج و بحث

برای اطمینان از صحت نتایج حاضر، در ابتدا شبیه سازی کوره مورد نظر [۲۶] با استفاده از سوخت زیست توده (ضایعات جنگلی)، انجام گرفت. ذرات از ورودی شماره یک تزریق می شوند. توزیع ذرات سوخت برمبنای رابطه روزین-راملر<sup>۳</sup> در نظر گرفته شده است که جزئیات آن به همراه سایر شرایط اولیه سوخت در جدول ۳ آورده شده است. آنالیز نهایی و تقریبی ذرات سوخت نیز در جدول ۴ ذکر شده است.

جدول ۳- شرایط اولیه ذرات سوخت زیست توده ورودی به کوره [۲۶]

Table 3- Initial conditions of biomass particles [26]

Minimum diameter (m)	$5 \times 10^{-6}$	Density ( $\text{kg/m}^3$ )	800
Maximum diameter (m)	$10^{-3}$	Thermal capacity ( $\text{kJ/kg.K}$ )	1220
Mean diameter (m)	$2.96 \times 10^{-3}$	Velocity (m/s)	5.49
Spread parameter	1.32	Temperature (K)	373
Number of dimension	40	Mass flow rate (kg/s)	$2.131 \times 10^{-3}$

1. SIMPLE
2. Upwind
3. Rosin-Rammler

جدول ۴- آناليز تقريبي و نهايي ذرات زيست توده [۲۶]

Table 4- Approximate and ultimate analysis of biomass particles [26]

Ultimate analysis (DAF)		Approximate analysis (% wt. raw)	
C	57.1	Moisture	6
H	5	Volatile Matter	82
O	23.68	Fixed Carbon	11.8
N	0.52	Ash	0.2
S	0	Heating value (MJ/kg)	16.83

گازهای فرار نیز به صورت یک گونه مصنوعی با فرمول شیمیایی  $C_{3.605}H_{9.877}O_{2.926}$  و جرم مولی (g/mol) ۹۹/۹۷ در نظر گرفته شد.

برای بررسی استقلال حل از شبکه از سه شبکه سازمان یافته با تعداد ۸۸۰۰ سلول، ۳۲۲۰۰ سلول و ۶۳۴۷۰ سلول استفاده شده است. بررسی بر روی درصد کسر مولی دی اکسید کربن ( $CO_2$ ) و اکسیژن ( $O_2$ ) بر روی محور تقارن نشان داد که با شبکه ۳۲۲۰۰ سلولی حل از شبکه مستقل شده و ریزتر کردن شبکه تأثیری در نتایج حاصل ندارد.

### اعتبارسنجی نتایج

برای اعتبارسنجی، نتایج شبیه سازی احتراق زیست توده با نتایج تجربی و عددی موجود در تحقیق آگرانوس [۲۶] مقایسه شدند. نتایج تجربی تنها در دو مورد درصد کسر مولی اکسیژن و دی اکسید کربن در مخلوط خشک بر روی محور تقارن موجود است. بنابراین، صحت سنجی نتایج تنها در این دو مورد انجام شد. درصد مولی یک گونه در مخلوط خشک به صورت رابطه (۱۶) تعریف می شود:

$$\% x_{i,dry} = \frac{x_i}{1-x_{H_2O}} \times 100 \quad (16)$$

شکل ۲-الف درصد کسر مولی اکسیژن در مخلوط خشک بر روی محور تقارن را نشان می دهد. همان طور که انتظار می رود، با فاصله گرفتن از ورودی و کامل شدن احتراق، اکسیژن موجود در طول محفظه مصرف شده و میزان آن کاهش می یابد. در شکل ۲-ب درصد کسر مولی دی اکسید کربن در مخلوط خشک بر روی محور تقارن نشان داده شده است. با سوختن کربن موجود در سوخت، میزان دی اکسید کربن در طول محفظه افزایش می یابد. همان طور که ملاحظه می شود، نتایج به دست آمده هم خوانی خوبی با نتایج عددی و تجربی مرجع [۲۶] داشته که صحت شبیه سازی حاضر را تایید می کند. البته نتایج عددی مرجع [۲۶] و نتایج عددی حاضر پیش بینی های دقیقی را در ابتدای دوره به دست نداده اند. به نظر می رسد آزادسازی مواد فرار و شروع واکنش ها در مدل های عددی با تأخیر بیشتری نسبت به واقعیت پیش بینی شده اند. برای بررسی این موضوع مطالعه پارامتری بر روی ضرایب موجود در مدل های عددی انجام شده است که شرح آن در مرجع [۲۶] آورده شده است.

### احتراق سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی و مقایسه با سوخت های جامد

لجن نفتی مورد مطالعه در این تحقیق، لجن حاصل از پالایشگاه اصفهان است که در تحقیق ناظم و توکلی [۳۲] مورد بررسی قرار گرفته است. آنالیز تقریبی و نهایی این سوخت بر مبنای سوخت خشک عاری از خاکستر (DAF) در جدول ۵ گزارش شده است. SODF سوختی با ارزش حرارتی پایین است که ۹۲/۶۲ درصد از وزن کل آن را رطوبت تشکیل داده است. به همین سبب، ابتدا، لجن نفتی در یک اجاق آزمایشگاهی حرارت داده می شود تا رطوبت آن کاملاً گرفته شود.

1. Dry-ash-free



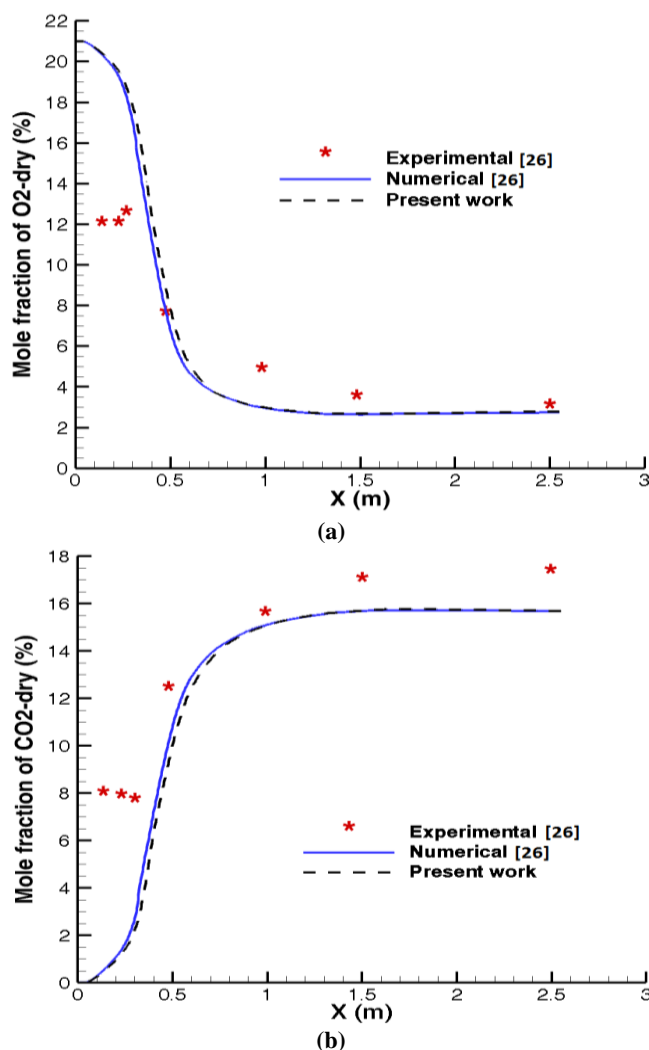


Figure 2- Comparison of (a) the percentage of oxygen mole fraction; and (b) the percentage of carbon dioxide mole fraction in the dry mixture for biomass fuel against the results of Ref. [26]

شکل ۲- اعتبارسنجی نتایج برای الف) درصد کسر مولی اکسیژن و ب) درصد کسر مولی دی اکسیدکربن، در مخلوط خشک بر روی محور تقارن برای سوخت زیست توده در مقایسه با نتایج مرجع [۲۶]

جدول ۵- آنالیز تقریبی و نهایی سوخت مشتق شده از لجن نفتی پالایشگاهی [۳۲]

Table 5- Approximate and ultimate analysis of SODF particles [32]

Ultimate analysis (DAF)		Approximate analysis (% wt raw)	
C	42.69	Moisture	0
H	5.35	Volatile Matter	48.0
O	46.61	Fixed Carbon	24.2
N	4.12	Ash	27.8
S	1.23	Heating value (MJ/kg)	13.866

احتراق لجن نفتی با مشخصات ذکر شده براساس توزیع ذرات رزین راملر، که در جدول ۳ آورده شده است، بررسی می شود. البته، به منظور دستیابی به دقت بیشتر و همگرایی بهتر حل، در این مطالعه از ۱۲۰ اندازه برای توزیع قطر ذرات استفاده شده است. شرایط هوای ورودی نیز مطابق جدول ۲ در نظر گرفته می شود. چگالی ذره SODF،  $989 \text{ (kg/m}^3\text{)}$  و گرمای ویژه آن  $1184 \text{ (kJ/kg.K)}$  است. گونه مصنوعی معادل گازهای فرار سوخت SODF هم با توجه به آنالیز تقریبی و

نهایی آن به صورت  $C_{1.14}H_{7.93}O_{4.35}N_{0.4397}S_{0.0573}$  در نظر گرفته می‌شود. این گونه دارای جرم مولی  $(g/mol)$  ۹۹,۳۸۱ است و از واکنش دومرحله‌ای مطابق رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) پیروی می‌کند.

در شکل ۳، مقایسه‌ای میان تغییرات دما در راستای محور تقارن برای سه سوخت زغال سنگ بیتومینوس<sup>۱</sup>، زیست‌توده و SODF انجام شده است. برای ذرات زغال سنگ از مشخصات پیش فرض در فلوئنت استفاده شده است. با آزاد شدن گازهای فرار موجود در سوخت، دما افزایش می‌یابد. پس از کامل شدن احتراق و رسیدن به دمای بیشینه در فاصله ۰/۵ m از ورودی کوره، کاهش دما آغاز می‌شود، به‌صورتی که در خروجی کوره تعادل دمایی اتفاق می‌افتد. با وجود اینکه لجن نفتی دارای ارزش حرارتی کمتری نسبت به زیست‌توده است، ولی بیشینه دمای آن بیشتر است. علت این موضوع را می‌توان به عدم وجود رطوبت در لجن نفتی نسبت داد، زیرا رطوبت موجود در سوخت مقدار زیادی از حرارت تولیدی حاصل از واکنش را جذب می‌کند تا تبخیر شود. همچنین، درصد کربن ثابت در سوخت مشتق شده از لجن نفتی پالایشگاهی بیشتر است (۲۴/۲ درصد برای لجن نفتی و ۱۱/۸ درصد برای زیست‌توده) و از آنجایی که کربن ثابت به‌طور مستقیم در واکنش شرکت می‌کند حرارت بیشتری تولید می‌کند و دمای احتراق بالاتر می‌رود. از سوی دیگر، در حین احتراق، ذرات زغال سنگ حرارت بیشتری تولید می‌کنند و دمای بیشینه بالاتری دارند، زیرا ارزش حرارتی زغال سنگ از دو سوخت دیگر بالاتر است (۳۱/۷۷ MJ/kg) [۳۱].

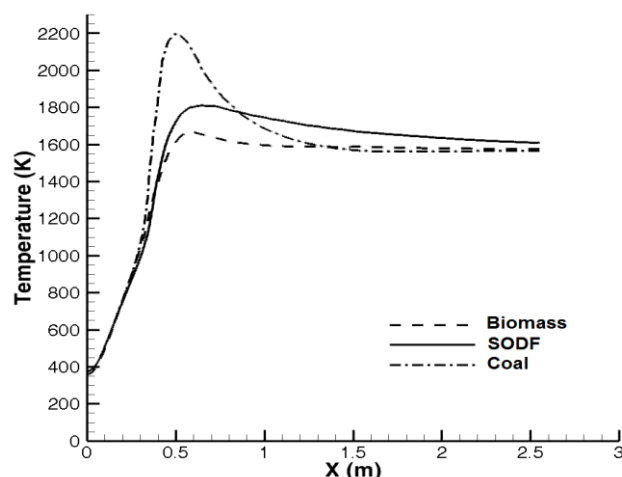


Figure 3- Comparison between temperature variations for biomass, SODF and coal on the axisymmetric line  
شکل ۳- مقایسه میان تغییرات دما بر روی محور تقارن برای سه سوخت زیست‌توده، لجن نفتی و زغال سنگ

در شکل ۴-الف مقایسه‌ای میان تغییرات کسر مولی دی‌اکسید کربن برای سه سوخت زیست‌توده، SODF و زغال سنگ بر روی محور تقارن انجام شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با فاصله گرفتن از ورودی محفظه، کسر مولی  $CO_2$  افزایش می‌یابد که دلیل آن انجام احتراق و تولید  $CO_2$  است. افزایش  $CO_2$  در ورودی برای زیست‌توده دارای شیب بیشتری نسبت به SODF است که به دلیل بیشتر بودن درصد جرمی مواد فرار در زیست‌توده نسبت به لجن نفتی پالایشگاهی است. این موضوع باعث می‌شود که مواد فرار بیشتری آزاد شوند و احتراق سریع‌تر اتفاق بیفتد. همچنین، در خروجی کوره، کسر مولی دی‌اکسید کربن برای SODF کمتر از دو سوخت دیگر است که به دلیل کمتر بودن درصد جرمی کربن در آنالیز نهایی SODF نسبت به زغال سنگ و زیست‌توده است (۴۲/۶۹ درصد برای لجن نفتی، ۵۷/۱ درصد برای زیست‌توده و ۷۴/۹ درصد برای زغال سنگ). هر چه میزان کربن موجود در سوخت بیشتر باشد، کربن بیشتری با اکسیژن واکنش می‌دهد و  $CO_2$  بیشتری تولید می‌شود [۳۳].

1. Bituminous

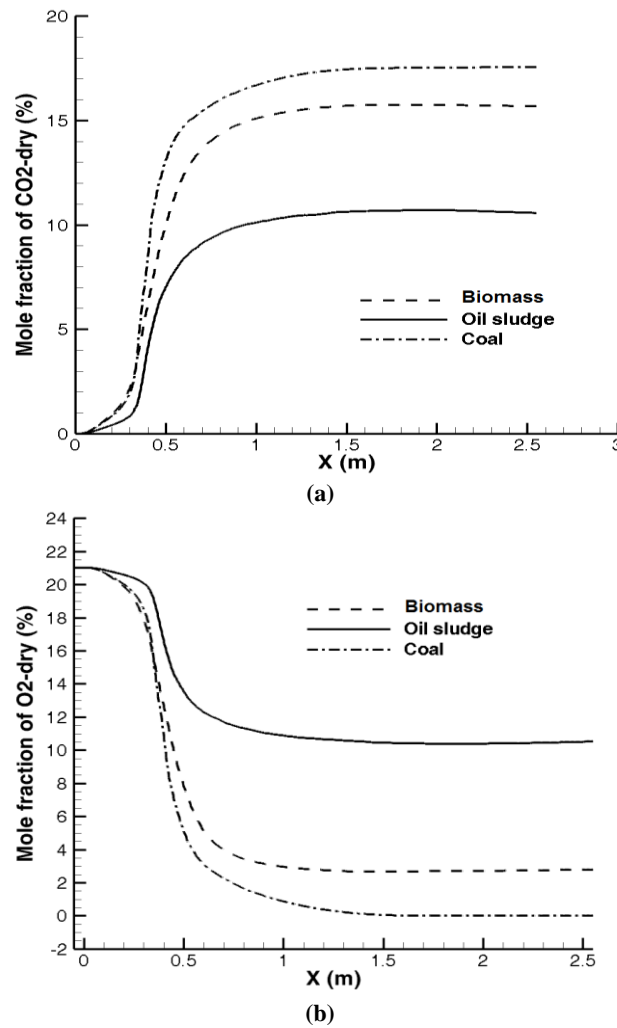


Figure 4- Comparison of variations a. mole fraction of carbon dioxide and b. mole fraction of oxygen, on the axisymmetric line

شکل ۴- مقایسه میان تغییرات الف) کسر مولی دی اکسید کربن، ب) کسر مولی اکسیژن، بر روی محور تقارن برای سه سوخت زیست توده، لجن نفتی و زغال سنگ

در شکل ۴-ب مقایسه ای میان تغییرات کسر مولی اکسیژن بر روی محور تقارن برای سه سوخت زغال سنگ، SODF و زیست توده نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، با فاصله گرفتن از ورودی کوره، کسر مولی اکسیژن در هر سه سوخت کاهش می یابد که به دلیل انجام احتراق و مصرف شدن اکسیژن است. شیب این تغییرات در ورودی کوره برای زیست توده بیشتر از SODF است که همان طور که پیش تر اشاره شد، به سبب بیشتر بودن درصد جرمی مواد فرار در زیست توده نسبت به SODF است. این موضوع باعث می شود مواد فرار بیشتری آزاد شده و احتراق سریع تر اتفاق بیفتد. در انتهای کوره نیز کسر مولی اکسیژن برای SODF نسبت به دو سوخت دیگر بیشتر است. وجود اکسیژن بیشتر در آنالیز نهایی SODF نسبت به زیست توده و زغال سنگ (۴۶/۶۱ درصد برای SODF، ۲۳/۶۸ درصد برای زیست توده و ۱۷/۸ درصد برای زغال سنگ)، باعث می شود مقداری از اکسیژن موجود در سوخت در احتراق شرکت کرده و بنابراین مقدار کمتری از اکسیژن موجود در هوا مصرف شود. بنابراین کسر مولی اکسیژن در انتهای کوره برای لجن نفتی بیشتر از دو سوخت جامد دیگر است. بر این اساس به نظر می رسد که سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی به میزان هوادهی کمتری برای انجام احتراق نیاز داشته باشد.

### بررسی تأثیر قطر ذرات بر روی احتراق سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی

اندازه ذرات سوخت پودر شده تأثیر زیادی در احتراق این نوع سوخت دارد. ذرات با قطر کوچکتر بهتر می‌سوزند، ولی از طرفی انرژی بیشتری صرف آسیاب کردن آن‌ها می‌شود. در شکل ۵، نمودار دما بر روی محور تقارن برای قطرهای مختلف ذرات سوخت نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش قطر ذرات بیشینه دما کاهش می‌یابد، به طوری که مقدار بیشینه دما برای ذراتی با قطر  $5 \times 10^{-5}$  m برابر با ۲۰۴۲ K و برای ذراتی با قطر  $6 \times 10^{-4}$  m برابر با ۱۷۵۴ K است. با افزایش قطر ذرات، میزان کربن نسوخته، که در اثر عدم واکنش آن‌ها با اکسیژن به وجود می‌آید، افزایش یافته و به همین علت، در اثر عدم سوختن کامل همهی کربن موجود در سوخت، بیشینه دما کاهش می‌یابد.

شکل ۵ همچنین نشان می‌دهد مکان بیشینه دما نیز با افزایش قطر ذرات از ورودی کوره فاصله می‌گیرد. این مکان برای ذراتی با قطر  $5 \times 10^{-5}$  m در فاصله ۳۵ cm و برای ذراتی با قطر  $6 \times 10^{-4}$  m در فاصله ۷۵ cm از ورودی کوره قرار می‌گیرد. با افزایش قطر ذرات، زمان مورد نیاز برای آزاد شدن گازهای فرار بیشتر شده و به همین علت احتراق دیرتر رخ می‌دهد. این موضوع در تحقیقات پیشین نیز بررسی و تایید شده است. لیاکوس و همکاران [۱۰] نشان دادند با کاهش قطر زغال سنگ دمای بالاتری درون کوره ایجاد می‌شود. هلتمر و همکاران [۳۴] نیز، با احتراق هم‌زمان زغال سنگ و خاک اره، نشان دادند با افزایش قطر ذرات طول ناحیه دما بالای شعله کاهش می‌یابد. کاردگر [۱۶] نیز نشان داد با افزایش قطر ذرات RDF بیشینه دما کاهش یافته و ناحیه دمابالا از ورودی کوره فاصله می‌گیرد.

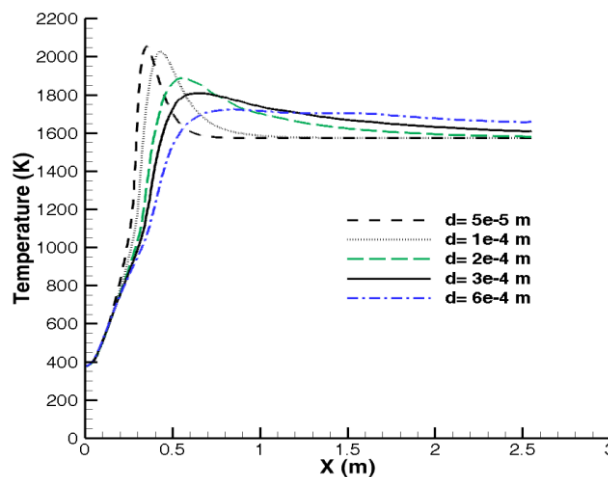


Figure 5- Effect of SODF particle diameter on the gas temperature along the axisymmetric line

شکل ۵- نمودار دما بر روی محور تقارن برای ذرات سوخت SODF با قطرهای مختلف

در شکل ۶، کانتور کسر جرمی گازهای فرار برای ذرات با قطرهای مختلف نشان داده شده است. در این شکل، کاملاً مشخص است که با افزایش قطر ذرات طول ناحیه آزاد شدن گازهای فرار افزایش می‌یابد. همچنین، این ناحیه در فاصله دورتری از ورودی کوره شکل می‌گیرد. با افزایش قطر ذره، جرم ذره افزایش می‌یابد و با توجه به معادله ۶ نرخ افزایش دمای ذره کاهش می‌یابد؛ در نتیجه ذرات برای رسیدن به دمای مشخصی باید مسیر بیشتری را طی کنند. به عبارت دیگر، در یک مکان مشخص، ذرات با قطر بزرگتر دمای کمتری خواهند داشت و به همین دلیل نرخ آزاد شدن گازهای فرار، که پارامتری وابسته به دماست، نیز کاهش می‌یابد. از طرفی، با افزایش قطر ذرات، طول ناحیه آزادسازی گازهای فرار کشیده‌تر می‌شود. این مسئله باید در طراحی کوره‌ها مورد توجه قرار گیرد، به این صورت که ذرات سوخت بزرگتر زمان ماند بیشتری نیاز داشته و در فاصله دورتری از ورودی کوره احتراق آن‌ها کامل می‌شود، به همین سبب کوره بزرگتری نیز مورد نیاز خواهد بود. الفاساخانی و همکاران [۱۳] یک مطالعه عددی و تجربی بر روی چوب پودر شده انجام دادند و مشاهده کردند اگر اندازه ذرات بزرگ باشد یا

سرعت جریان زیاد شود، واکنش‌های اکسیداسیون به سمت خروجی کوره نزدیک می‌شوند؛ از این رو، اکسیداسیون ناقص رخ می‌دهد. در این خصوص در مراجع دیگر نیز نتایج مشابهی گزارش شده است [۱۶،۱۰].

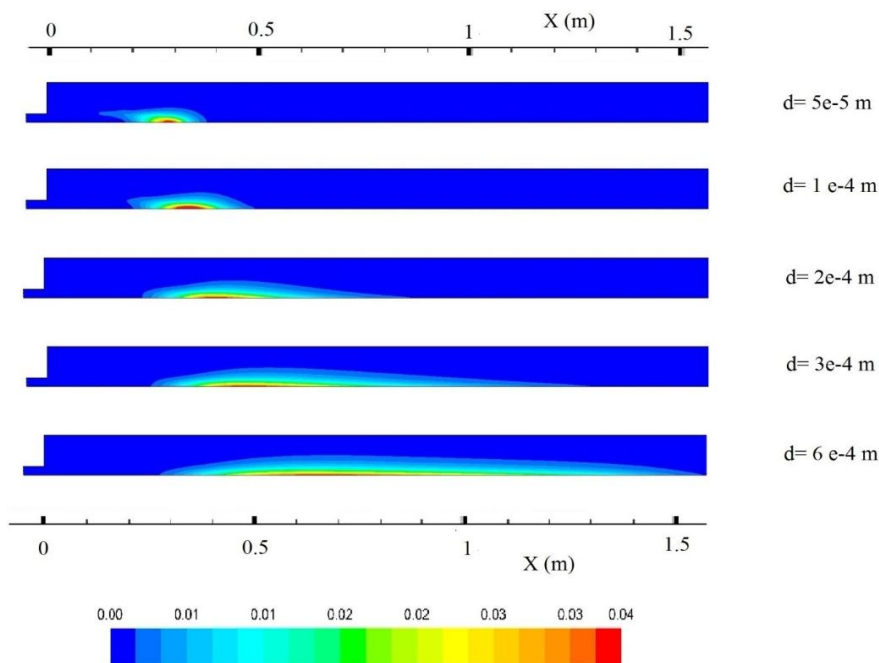


Figure 6- Contours of volatiles mass fraction for SODF with various particles diameter  
 شکل ۶- کانتور کسر جرمی گازهای فرار برای ذرات سوخت SODF با قطرهای مختلف

### بررسی تأثیر میزان رطوبت بر روی احتراق سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی

درصد رطوبت سوخت‌های جامد پودر شده یکی از پارامترهای مهم در احتراق این نوع سوخت‌هاست. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شده، لجن نفتی پالایشگاهی مورد مطالعه دارای درصد بالایی رطوبت است. به همین دلیل، می‌توان با استفاده از دستگاه‌های گریز از مرکز به آب‌گیری از آن پرداخت و یا با حرارت دادن از رطوبت آن کاست. در این بخش، به منظور بررسی تأثیر میزان رطوبت موجود در سوخت مورد مطالعه، احتراق سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی با درصدهای رطوبت متفاوت بررسی می‌شود. در شکل ۷، کانتور تغییرات دما برای درصدهای مختلف رطوبت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد جرمی رطوبت در آنالیز تقریبی سوخت، بیشینه دما کاهش می‌یابد. این مقدار برای سوخت SODF بدون رطوبت برابر ۱۸۲۵ K و برای سوخت با رطوبت ۳۰ درصد، ۱۶۲۸ K است. افزایش رطوبت سوخت تحت تأثیر سه عامل سبب کاهش دمای احتراق می‌شود. اول، افزایش کسر جرمی بخار آب و به دنبال آن کاهش درصد جرمی مواد قابل احتراق گرمای آزاد شده از احتراق را کاهش می‌دهد. دوم، ظرفیت حرارتی بخار آب نسبت به سایر گونه‌ها بیشتر است، بنابراین با افزایش کسر جرمی بخار آب، ظرفیت حرارتی مخلوط افزایش یافته و دمای محصولات احتراق کاهش می‌یابد. سوم، از آنجایی که فرایند تبخیر رطوبت یک فرایند گرماگیر است، حرارت زیادی صرف تبخیر رطوبت شده و در نتیجه دمای محصولات کاهش می‌یابد. در شکل ۸، نمودار کسر جرمی گازهای فرار برای احتراق سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی با درصدهای رطوبت مختلف نشان داده شده است. در حین انجام واکنش، مواد فرار آزاد می‌شوند و در فاصله تقریبی ۰/۵ m از ورودی کوره به حداکثر مقدار خود می‌رسند. سپس، با کامل شدن احتراق، کسر جرمی گازهای فرار کاهش یافته و در نهایت به صفر می‌رسد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش رطوبت، کسر جرمی گازهای فرار آزاد شده کاهش می‌یابد و ناحیه آزادسازی گازهای فرار

گسترده‌تر می‌شود. بیشینه کسر جرمی گازهای فرار برای سوخت با رطوبت صفر درصد، حدود ۰/۰۳۸ و برای سوخت با رطوبت ۳۰ درصد، به میزان ۰/۰۱۱ می‌رسد. با افزایش محتوای رطوبت در آنالیز تقریبی سوخت، کسر جرمی گازهای فرار کاهش می‌یابد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، با بالارفتن ظرفیت حرارتی مخلوط، به دلیل وجود گونه بخار آب، دما با نرخ کمتری افزایش یافته و آزاد شدن گازهای فرار و شروع احتراق با تاخیر اتفاق می‌افتد. بنابراین، زمان ماند نیز افزایش می‌یابد و به کوره‌ای با طول بیشتر نیاز خواهد بود.

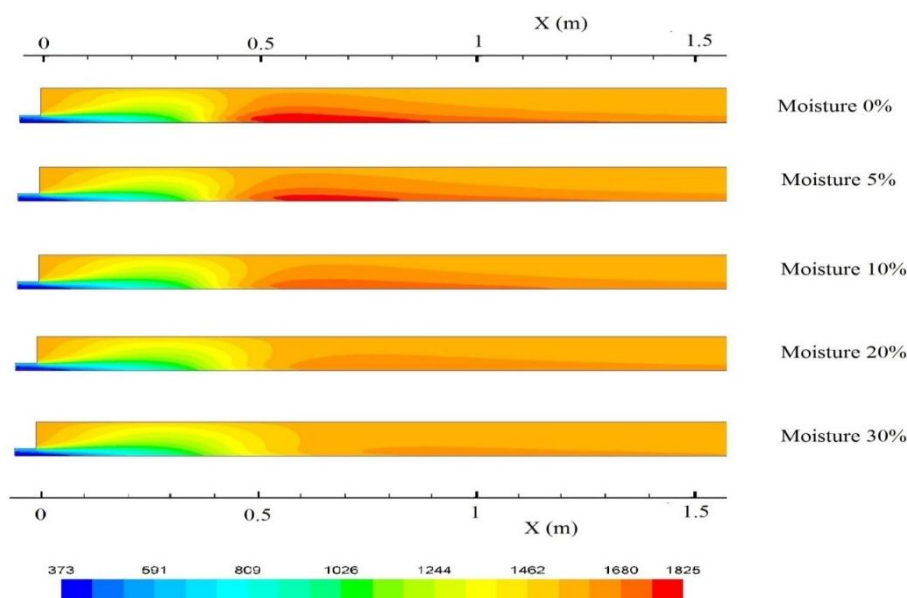


Figure 7- Temperature contours for SODF combustion with different humidity  
 شکل ۷- کانتورهای دما برای احتراق سوخت SODF با درصد‌های رطوبت مختلف

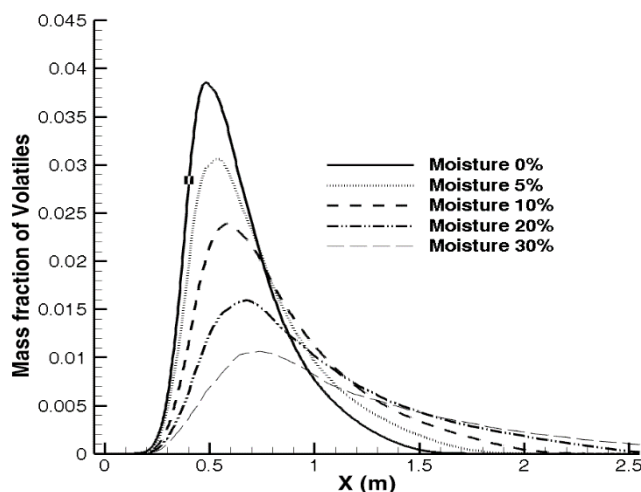


Figure 8- Effect of SODF moisture content on the volatiles mass fraction released along the axisymmetric line  
 شکل ۸- نمودار کسر جرمی گازهای فرار برای احتراق سوخت SODF با درصد‌های رطوبت مختلف

بررسی تأثیر دبی جرمی سوخت بر روی پارامترهای احتراقی سوخت جامد مشتق‌شده از لجن نفتی به‌منظور بررسی تأثیر میزان دبی جرمی سوخت ورودی بر روی پارامترهای احتراقی سوخت SODF، تغییرات کسر جرمی گازهای فرار و دمای گازهای احتراقی در شکل ۹ نشان داده شده است. دبی جرمی سوخت ورودی از ۰/۱۵ gr/s تا ۰/۲۹ gr/s

تغییر داده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۹-الف مشاهده می‌شود، با کاهش دبی جرمی سوخت ورودی، کسر مولی مواد فرار آزاد شده، که در واکنش شرکت می‌کنند، کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که، با کاهش ۲۸ درصدی دبی جرمی سوخت، بیشینه‌ی کسر مولی مواد فرار آزاد شده ۴۵ درصد کاهش می‌یابد. شکل ۹-ب نشان می‌دهد که تغییرات دبی جرمی سوخت ورودی در محدوده مورد بررسی تأثیر اندکی بر بیشینه دمای احتراق (در حدود ۳ درصد) دارد. براساس شکل ۹، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر دبی جرمی سوخت ورودی تأثیر چندانی بر مکان بیشینه مواد فرار و بیشینه دمای احتراق ندارد.

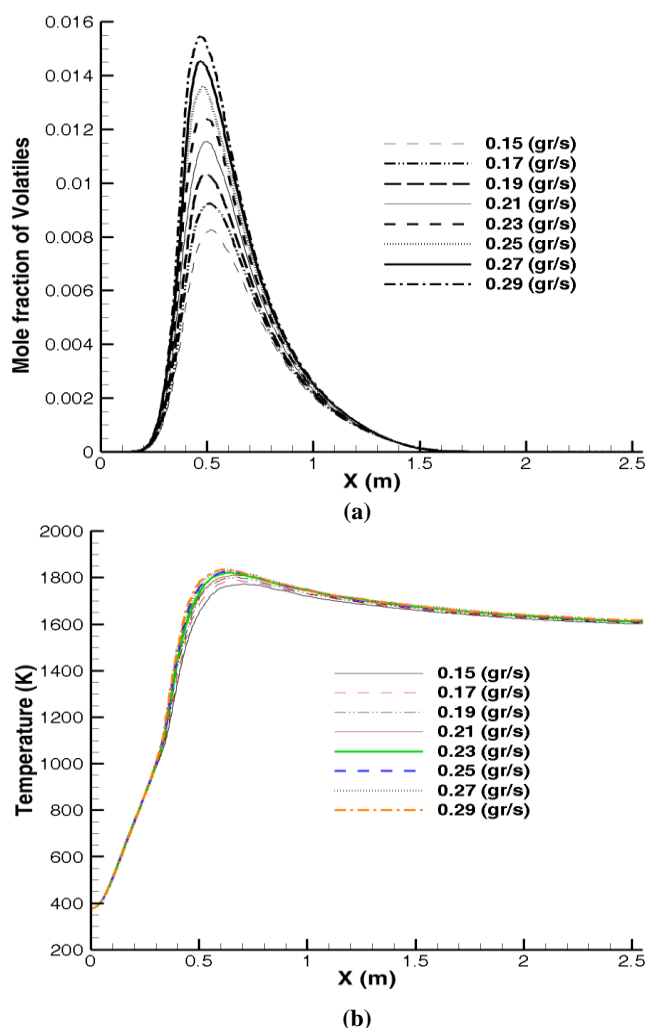


Figure 9- Effect of SODF entrance mass flow rate on the variation of (a) volatiles mole fraction and (b) gas temperature along the axisymmetric line

شکل ۹- اثر تغییرات دبی جرمی سوخت SODF ورودی بر روی الف: کسر جرمی گازهای فرار و ب: دمای گاز بر روی محور تقارن

در شکل ۱۰، تغییرات کسر مولی دی‌اکسید کربن و مونواکسید کربن بر روی محور تقارن برای دبی‌های جرمی مختلف سوخت ورودی نشان داده شده است. شکل ۱۰-الف نشان می‌دهد، با افزایش نرخ سوخت ورودی، میزان انتشار  $CO_2$  افزایش یافته و این افزایش تا خروجی کوره ادامه می‌یابد. از سوی دیگر، با کاهش دبی جرمی سوخت ورودی و در نتیجه کاهش میزان مواد قابل احتراق موجود در محفظه احتراق، کسر جرمی  $CO_2$  کاهش می‌یابد. به این ترتیب، رفتار متضادی را می‌توان برای مولکول  $O_2$  انتظار داشت؛ به این صورت که با افزایش دبی جرمی سوخت ورودی و میزان مواد قابل احتراق موجود در سوخت،

اكسيژن بيشترى براى كامل شدن احتراق مصرف مى شود و در نتيجه كسر مولى اكسيژن در خروجى كوره كاهش مى يابد. شكل ۱۰-ب نشان مى دهد كه با افزايش ديبى جرمى سوخت ورودى و افزايش نرخ احتراق در محفظه احتراق، CO بيشترى توليد مى شود. كسر مولى CO در يك سوم ورودى كوره به بيشينه مقدار خود رسيده و سپس، با تكميل واكنش، به CO<sub>2</sub> تبديل مى شود. بنا بر اين، كسر مولى CO در خروجى كوره به حدود صفر مى رسد. همچنين، با كاهش ديبى جرمى سوخت ورودى و در نتيجه كاهش كسر مولى مواد فرار در محفظه احتراق، بيشينه كسر مولى CO كاهش مى يابد.

به طور خلاصه، مى توان گفت، با افزايش ۳۸ درصدى ديبى جرمى سوخت ورودى، بيشينه دماى احتراق تنها ۳ درصد افزايش، بيشينه كسر مولى آزاد شدن مواد فرار ۷۲ درصد افزايش، كسر مولى CO<sub>2</sub> ۳۷ درصد افزايش و بيشينه كسر مولى CO ۳۹ درصد افزايش مى يابد. از سوى ديگر، با كاهش ۲۸/۵ درصدى ديبى جرمى سوخت ورودى، بيشينه دماى احتراق تنها ۲/۶ درصد كاهش، بيشينه كسر مولى آزاد شدن مواد فرار ۴۵ درصد كاهش، كسر مولى CO<sub>2</sub> ۲۳ درصد كاهش و بيشينه كسر مولى CO، ۲۹ درصد كاهش مى يابد. مى توان نتيجه گرفت، در محدوده مورد مطالعه، كاهش ديبى جرمى سوخت تأثير چندانى بر دماى گازهاى احتراقى ندارد، ولي انتشار گونه هاى CO<sub>2</sub> و CO كاهش مطلوبى را تجربه مى كنند.

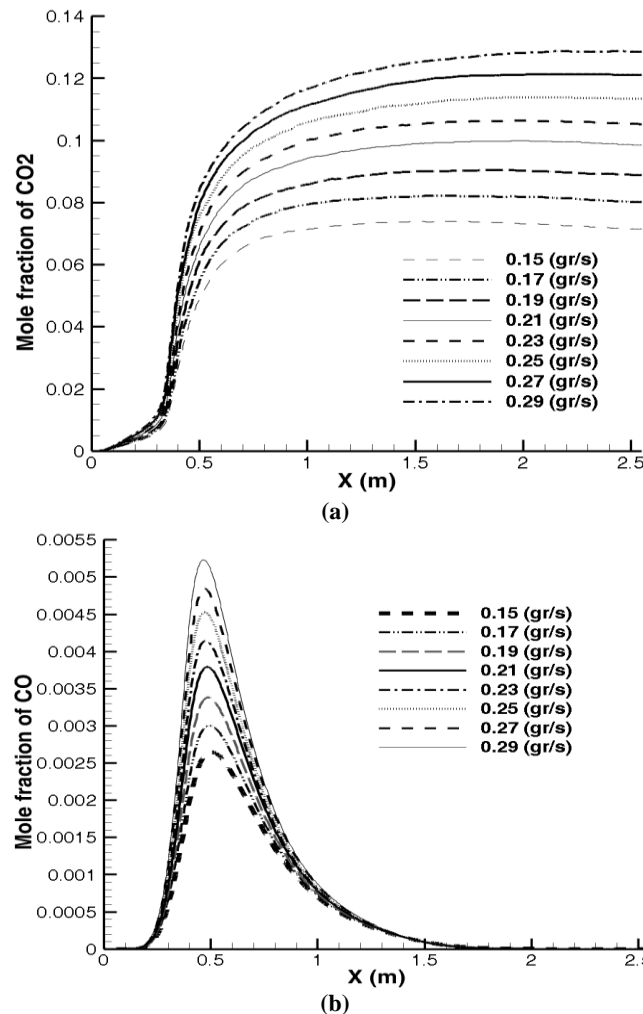


Figure 10- Effect of SODF entrance mass flow rate on the variation of (a) carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) mole fraction and (b) carbon monoxide (CO) mole fraction along the axisymmetric line.

شكل ۱۰- اثر تغييرات ديبى جرمى سوخت SODF ورودى روى الف: كسر مولى دى اكسيد كربن ب: كسر مولى مونوكسيد كربن در محور تقارن



## نتیجه گیری

در این تحقیق، احتراق لجن نفتی پالایشگاهی به عنوان یک راهکار برای مدیریت این پسماند بررسی شد. در مقایسه میان خواص احتراقی زغال سنگ، SODF و زیست توده، مشاهده شد که با وجود ارزش حرارتی پایین تر SODF بیشینه دمای آن بر روی خط مرکزی کوره نسبت به زیست توده بیشتر است. این موضوع را می توان به علت عدم وجود رطوبت در SODF مورد مطالعه و دارا بودن درصد جرمی کربن ثابت بالاتر نسبت داد. قطر ذرات و تأثیر آن بر احتراق عامل دیگری بود که مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد، با کاهش قطر ذرات، بیشینه دمای محصولات احتراق افزایش می یابد. همچنین، مطالعه ای در زمینه تأثیر رطوبت موجود در سوخت بر روی خواص احتراقی انجام شد که نشان داد افزایش رطوبت موجب کاهش بیشینه دمای کوره می شود. به عبارت دیگر، با افزایش ۳۰ درصدی جرم رطوبت در آنالیز تقریبی سوخت، بیشینه دما حدود ۱۱ درصد کاهش یافت. مطالعه ای نیز بر روی تأثیر دبی جرمی سوخت ورودی انجام شد که ثابت کرد در محدوده مورد بررسی کاهش دبی جرمی سوخت ورودی تأثیر چندانی بر دمای گازهای احتراقی ندارد، ولی کسر مولی CO و CO<sub>2</sub> کاهش مطلوبی را تجربه می کنند. در نهایت، نتایج حاصل از احتراق سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی نشان داد با انجام آماده سازی سوخت، نظیر کاهش رطوبت و استفاده از ذرات با قطر کوچک تر، می توان از ارزش حرارتی لجن نفتی به نحو مطلوبی استفاده کرد.

## تشکر و قدردانی

در پایان، از راهنمایی های ارزشمند جناب آقای دکتر امین کاردرگر در زمینه مدل سازی عددی احتراق سوخت جامد تشکر می شود.

## منابع

1. G. Hu, J. Li and G. Zeng, "Recent Development in the Treatment of Oily Sludge from Petroleum Industry: A Review," *Journal of Hazardous Materials*, 261, 2013, pp. 470-490.
2. B. Cui, F. Cui, G. Jing, S. Xu, W. huo and S. Lui, "Oxidation of Oily sludge in Supercritical Water," *Journal of Hazardous Materials*, 165, 2009, pp. 511-517.
3. G. Jing, M. Luan, C. Han, T. Chen and H. Wang, "An Effective Process for Removing Organic Compounds from Oily Sludge Using Soluble Metallic Salt," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18, 2012, pp. 1446-1449.
4. B. Leckner, L. E. Amand, K. Lücke and J. Werther, "Gaseous Emissions from Co-Combustion of Sewage Sludge and Coal/Wood in a Fluidized Bed," *Fuel*, 83, 2004, pp. 477-486.
5. T. Malkow, "Novel and Innovative Pyrolysis and Gasification Technologies for Energy Efficient and Environmentally Sound MSW Disposal," *Waste Manage*, 24, 2004, pp. 53-79.
6. P. Stasta, J. Boran, L. Bebar, P. Stehlik and J. Oral, "Thermal Processing of Sewage Sludge", *Applied Thermal Engineering*, 26, 2006, pp. 1420-1426.
7. P. Molcan, G. Lu, T. L. Bris, Y. Yan, B. Taupin and S. Caillat, "Characterization of Biomass and Coal Co-Firing on a 3 MWth Combustion Test Facility using Flame Imaging and Gas/Ash Sampling Techniques," *Fuel*, 88, 2009, pp. 2328-2334.
8. A. A. Bhuiyan and J. Naser, "Computational Modeling of Co-Firing of Biomass with Coal under Oxy-Fuel Condition in a Small Scale Furnace," *Fuel*, 143, 2015, pp. 455-466.
9. L. Lu, T.M. Ismail, Y. Jin, M. El-Salam and K. Yoshikawa, "Numerical and Experimental Investigation on Co-Combustion Characteristics of Hydrothermally Treated Municipal Solid Waste with Coal in a Fluidized Bed," *Fuel Processing Technology*, 154, 2016, pp. 52-65.
10. R. Weber, T. Kupka and K. Zaja, "Jet Flames of a Refuse Derived Fuel," *Combustion and Flame*, 156, pp. 922-927, 2009.
11. J. Pallares, A. Gil, C. Cortes and C. Herce, "Numerical Study of Co-Firing Coal and Cynara Cardunculus in a 350 MWe Utility Boiler," *Fuel Processing Technology*, 90, 2009, pp. 1207-1213.
12. H. H. Liakos, K. N. Thoelogs, A. G. Boundovis and N. C. Markatos, "Pulverized Coal Char Combustion: The Effect of Particle Size on Burner Performance," *Applied Thermal Engineering*, 18, 1998, pp. 981-989.
13. A. Elfakhany, L. Tao, B. Espenas, J. Larfeldt and X. S. Bai, "Pulverised Wood Combustion in a Vertical Furnace: Experimental and computational Analyses," *Applied Energy*, 112, 2013, pp. 454-464.
14. L. Ma, J. M. Jones, M. Pourkashanian and A. Williams, "Modelling the Combustion of Pulverized Biomass in an Industrial Combustion Test Furnace," *Fuel*, 86, 2007, pp. 1959-1965.

15. C. Yin, S. K. Kær, L. Rosendahl and S. L. Hvid, "Co-Firing Straw with Coal in a Swirl-Stabilized Dual-Feed Burner: Modeling and Experimental Validation," *Bio Resource Technology*, 101, 2010, pp. 4169-4178.
16. M. Agraniotis, N. Nikolopoulos, P. Grammelis and E. Kakaras, "Numerical Investigation of Solid Recovered Fuels' Co-Firing with Brown Coal in Large Scale Boilers - Evaluation of Different Co-Combustion Modes," *Fuel*, 89, 2010, pp. 3693-3709.
17. C. Yin, L. Rosendahl and S. K. Kær, "Towards a Better Understanding of Biomass Suspension Co-Firing Impacts Via Investigating a Coal Flame and a Biomass Flame in a Swirl-Stabilized Burner Flow Reactor under Same Conditions," *Fuel Processing Technology*, 98, 2012, pp. 65-73.
18. A. Kardgar, *Numerical combustion simulation of refused derived fuels (RDF) to investigate their combustion parameters*, M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2013. (In Persian)
19. H. Lu, E. Ip, J. Scott, P. Foster, M. Vickers and L. L. Baxter, "Effects of Particle Shape and Size on Devolatilization of Biomass Particle," *Fuel*, 89, 2010, pp. 1156-1168.
20. I. Bonefacic, B. Frankovic and A. Kazagic, "Cylindrical Particle Modeling in Pulverized Coal and Biomass Co-Firing Process," *Applied Thermal Engineering*, 78, 2015, pp. 74-81.
21. S. R. Gubba, L. Ma, M. Pourkashanian and A. Williams, "Influence of Particle Shape and Internal Thermal Gradients of Biomass Particles on Pulverized Coal/Biomass Co-Fired Flames," *Fuel Processing Technology*, 92, 2011, pp. 2185-2195.
22. S. R. Gubba, D.B. Ingham, K.J. Larsen, L. Ma, M. Pourkashanian, H. Z. Tan, A. Williams and H. Zhou, "Numerical Modeling of the Co-Firing of Pulverized Coal and Straw in a 300 MWe Tangentially Fired Boiler," *Fuel Processing Technology*, 104, 2012, pp. 181-188.
23. L. Zhou, X. Jian and J. Liu, "Characteristics of Oily Sludge Combustion in Circulating Fluidized Beds," *Journal of Hazardous Materials*, 170, 2009, pp. 175-179.
24. J. Liu, X. Jiang, L. Zhou, H. Wang and X. Han, "Co-Firing of Oil Sludge with Coal-Water Slurry in an Industrial Internal Circulating Fluidized Bed Boiler," *Journal of Hazardous Materials*, 167, 2009, pp. 817-823.
25. S. S. Hou, M. C. Chen and T. H. Lin, "Experimental Study of the Combustion Characteristics of Densified Refuse Derived Fuel (RDF-5) Produced from Oil Sludge," *Fuel*, 116, 2014, pp. 201-207.
26. M. Agraniotis, *Coal Substitution of Alternative and Support in Fuel Boilers for Pulverized Fuel CO2 Emission Reduction*, PhD Thesis, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, 2010.
27. H. Ettouati, A. Boutoub and H. Benticha, "Radiative Heat Transfer in Pulverized Coal Combustion: Effects of Gas and Particles Distributions," *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, 31, 2007, pp. 345-353.
28. ANSYS FLUENT Theory Guide, Version 14, Ansys Inc., USA, 2011.
29. F. Tabet and I. Gökalp, "Review on CFD Based Models for Co-Firing Coal and Biomass," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 2015, pp. 1101-1114.
30. R. C. Borah, P. Ghosh, and P. G. Rao, "A Review on Devolatilization of Coal in Fluidized Bed," *International Journal of Energy Research*, 35, 2011, pp. 929-963.
31. B. Miller and D. Tillman, *Combustion Engineering Issues for Solid Fuel*, First Edition, Academic Press, USA, 2008.
32. M. Nazem and O. Tavakoli, "Bio-Oil Production from Refinery Oily Sludge Using Hydrothermal Liquefaction Technology," *Journal of Supercritical Fluids*, 127, 2017, pp. 33-40.
33. A. Shirmeshan and H. Jamalvand, "Numerical investigation of Combustion of Biomass, Methane, and Gasoil Fuels and Emissions from a Furnace Chamber" *Energy and Policy Research*, 3, 2016, pp. 19-26.
34. M. L. Holtmeyer, B. M. Kumfer and R. L. Axelbaum, "Effects of Biomass Particle Size During Cofiring under Air-Fired and Oxyfuel Conditions," *Applied Energy*, 93, 2012, pp. 606-613.

English Abstract

## Numerical study of the effect of moisture content, particle diameter and fuel mass loading on combustion of solid fuel derived from refinery oily-sludge

Soulmaz Farahvashi<sup>1</sup> and Sobhan Emami<sup>2\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, s\_farahvashi@yahoo.com

2- Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, sobhan@pmc.iaun.ac.ir

\*Corresponding author

(Received: 2017.3.16, Received in revised form: 2018.5.16, Accepted: 2018.6.12)

A large amount of oil sludge is produced annually during the operation and process activities on crude oil. The burning of oil sludge can be considered as an approach in order to recover the energy as well as to control and mitigate risks of this hazardous waste. In the present study, the combustion of solid fuel derived from refinery oily-sludge is conducted numerically in a 2-D axisymmetric furnace. Investigating the effect of fuel particle diameter on the combustion process shows that with increasing particle diameter the maximum temperature reduces and the maximum temperature location goes farther from the furnace entrance. In order to investigate the effect of dewatering refinery oily-sludge on combustion properties, a study was conducted on the moisture content of fuel. The results show that an increase of 30% in moisture content in proximate fuel analysis reduces the maximum temperature by about 11%. Also, the effect of the fuel mass flow rate is investigated in the range of 0.15 gr/s to 0.29 gr/s. The results show that reducing the fuel mass load has a slight impact on maximum temperature of gas flow. However, CO and CO<sub>2</sub> emissions experience a desirable decline. The study on combustion of solid fuels derived from oil-sludge shows that by making fuel preparation such as reducing the moisture content and using smaller particles, it is possible to exploit the heat value of oil sludge.

**Keywords:** Refinery oily-sludge, Pulverized solid fuel combustion, Particle diameter, Moisture content, Fuel mass flow rate