

## شبیه سازی عددی احتراق سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی پالایشگاهی

سولماز فرح وشی

کارشناس ارشد - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد  
s\_faravashi@yahoo.com

سبحان امامی کویانی

استادیار - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد  
sobhan@pmc.iaun.ac.ir

### چکیده

سالانه مقدار زیادی لجن نفتی حین بهره برداری و فعالیت‌های فرآیندی بر روی نفت خام تولید می‌شود. سوزاندن لجن نفتی در راستای بازیافت انرژی موجود در آن و همچنین به عنوان 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 کورهی دوبعدی دارای تقارن محوری به منظور بررسی ویژگی‌های احتراقی این نوع سوخت انجام شده است. از دیدگاه اویلری جهت شبیه‌سازی میدان جریان گازی و از دیدگاه لاگرانژی جهت شبیه‌سازی ذرات سوخت استفاده شده است. در فاز گازی به منظور مدل‌سازی جریان احتراقی آشفته مدل اغتشاشی k-E استاندارد و مدل احتراقی اضمحلال گردابه‌ها (EDM) به کار گرفته شده است. بررسی تاثیر قطر ذرات سوخت بر فرآیند احتراق نشان داد با افزایش قطر ذرات از  $5 \times 10^{-5}$  m تا  $6 \times 10^{-4}$  m مقدار بیشینهی دما حدود ۱۴ درصد کاهش یافته و مکان بیشینهی دما نیز ۴۰ cm از ورودی کوره دورتر می‌شود. به منظور بررسی اثر میزان آب‌گیری از لجن 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 بیشینهی دما را در حدود ۱۱ درصد کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی: سوخت جامد، لجن نفتی، قطر ذرات، محتوای رطوبت، گونه‌ی مصنوعی.

### ۱- مقدمه

ایران دارای ۱۰ درصد از منابع کشف شده نفت جهان می‌باشد و از این لحاظ در رتبه سوم جهان قرار دارد. این در حالی است که همواره در حین مراحل مختلف تولید، پالایش و بهره برداری، حجم زیادی ضایعات نفتی که از آن به عنوان لجن نفتی<sup>۱</sup> یاد می‌شود در کشور تولید می‌شود. به‌طور کلی لجن‌های نفتی شامل سه جزء آب، روغن (شامل نفتالین‌ها، پارافین‌ها و آسفالت‌ها) و مواد جامد می‌باشند که خطری بالقوه برای محیط زیست به شمار می‌آیند و باید به نحوی مناسب امحاء شوند [۱]. سوزاندن از گذشته یکی از راهکارهای امحاء انواع پسماند به شمار می‌رود [۲-۴]. با توجه به وجود حجم زیادی مواد قابل اشتعال در لجن نفتی، سوزاندن آن‌ها نه تنها باعث کم شدن حجمشان می‌شود، بلکه بازیافت انرژی را نیز موجب می‌شود. احتراق سوخت‌های جامد با ارزش حرارتی پائین (مانند سوخت مشتق شده از لجن نفتی) چالش‌هایی را از لحاظ حجم کوره، طراحی کوره و نحوه‌ی هوا دهی به همراه دارند که باید مورد بررسی و تحقیق قرار گیرد. این در حالی است که اکثر تحقیقات انجام شده در حوزه‌ی 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 [۵-۷]. مطالعات زیادی نیز بر روی تاثیر قطر ذرات انجام شده است [۸-۱۳] که نشان می‌دهد با افزایش قطر بیشه‌ی دمای احتراق کاهش می‌یابد و در فاصله‌ی دورتری از ورودی کوره احتراق تشکیل می‌شود. همچنین درصد مواد نسوخته با افزایش قطر، افزایش می‌یابد که ثابت می‌کند ذرات بزرگ‌تر به زمان ماند<sup>۲</sup> (زمان اقامت) بیش‌تری نیاز دارند. از سوی دیگر برای ذرات با قطر چند صدم میکرون، انتقال حرارت درون ذرات، تاثیر چندانی بر فرآیند احتراق ندارد [۹، ۱۴ و ۱۵]. در خصوص تاثیر شکل ذرات نیز کارهای زیادی انجام شده است [۹، ۱۴ و ۱۶] که نشان می‌دهد با افزایش نسبت منظری 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، در واقع فرض کروی بودن فرآیندهای احتراقی را به تاخیر می‌اندازد. همچنین مدل‌هایی که ذرات را به صورت غیر کروی در نظر می‌گیرند غلظت مونواکسید کربن و مونواکسید نیتروژن در گازهای خروجی را بهتر پیش‌بینی می‌کنند [۱۷].

در خصوص بررسی خواص شعله لجن نفتی کارهای انجام شده بسیار محدود بوده و تنها به مطالعات تجربی محدود می‌باشند. زو و همکاران [۱۸] احتراق لجن نفتی را در یک کوره بستر سیالی چرخان<sup>۳</sup> به‌صورت تجربی مطالعه کردند. ایشان دریافتند که دمای بستر اثر زیادی بر روی میزان آزادسازی مواد فرار لجن نفتی دارد. همچنین به نظر می‌رسد احتراق لجن نفتی بعد از تجزیه آن صورت می‌گیرد. لیو و همکاران [۱۹] نیز احتراق هم‌زمان لجن نفتی با زغال‌سنگ را در یک کوره بستر سیالی چرخان به‌صورت تجربی مطالعه کردند. نتایج نشان داد که احتراق هم‌زمان لجن نفتی با زغال‌سنگ خواص عملکردی خوبی دارد. انتشار آلاینده‌ها در محدوده‌ی مقررات زیست محیطی چین قرار داشت و آنالیز فلزات سنگین در خاکستر ته نشین شده، نشان داد که خاکسترهای احتراقی می‌توانند به عنوان خاک زراعی استفاده شوند. هو و همکاران [۲۰] نیز خواص احتراقی چهار نوع سوخت مشتق شده از لجن نفتی با ترکیبات مختلف را آزمایش کردند. نتایج نشان داد ارزش حرارتی لجن نفتی برای استفاده به عنوان یک سوخت مشتق شده از ضایعات<sup>۴</sup> (RDF) مناسب است و هرچه میزان لجن نفتی بیش‌تر می‌شود، RDF سخت‌تر می‌سوزد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود تاکنون کار عددی در خصوص احتراق سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی انجام نشده است. در حال حاضر کوره‌های آجرپزی، کوره‌های زباله‌سوز، کوره‌های آسفالت و صنایع سیمان از این مواد به عنوان خوراک خود استفاده می‌نمایند؛ ولی با این حال، مطالعه و بررسی

<sup>2</sup> Resident Time

<sup>3</sup> Circulating Fluidized Bed

<sup>4</sup> Refuse Derived Fuel

<sup>1</sup> Oil Sludge

بر روی احتراق لجن نفتی موضوعی بسیار نوپا به حساب می‌آید در صورتی که برای طراحی مشعل‌ها و کوره‌هایی که با سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی (SODF<sup>1</sup>) کار می‌کنند، مطالعه دقیق پارامترهای احتراقی و عوامل موثر بر آن‌ها ضروری است. بنابراین در این تحقیق سعی می‌شود خواص شعله و پارامترهای احتراقی سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی توسط شبیه‌سازی عددی مطالعه گردد.

## ۲- معادلات حاکم و روش حل عددی

از آنجایی که در احتراق سوخت‌های جامد از جمله SODF جریان دو فازی حاکم است؛ جهت مدل‌سازی فاز پیوسته یا جریان سیال از روش اویلری و جهت مدل‌سازی فاز گسسته یا ذرات از روش لاگرانژی استفاده می‌شود. معادلات حاکم بر جریان سیال آشفته واکنشی داخل محفظه احتراق، عبارتند از: معادله بقای جرم، معادله ممنتوم، معادله بقای انرژی و معادله گونه‌ها؛ که با استفاده از رویکرد معادلات متوسط‌گیری شده‌ی زمانی ناویر استوکس یا RANS به‌دست می‌آیند. مدل‌سازی آشفته‌گی توسط روش k-ε انجام می‌شود. همچنین از آنجایی که اهمیت در نظر گرفتن انتقال حرارت تشعشی در مدل‌سازی احتراق سوخت جامد توسط محققان مختلفی [۱۱ و ۲۱] نشان داده شده است در کار حاضر جهت مدل‌سازی تشعشع روش جهات مجزا (DO) به کار برده می‌شود. برای محاسبه ضریب جذب گازهای احتراقی از مدل توزیع وزنی مجموع گازهای خاکستری (WSGGM) استفاده شده است.

مدل‌سازی ذرات سوخت نیز در چهارچوب لاگرانژی انجام می‌شود. مسیر حرکت ذره توسط معادله ممنتوم به‌دست می‌آید که شامل نیروهای حجمی، پسا و ثقل است و برای محاسبه ضریب پسا، ذرات به‌صورت کروی فرض می‌شوند. جهت بررسی اثر جریان آشفته بر حرکت ذرات نیز از مدل حرکت تصادفی مجزا<sup>۲</sup> (DRW) استفاده می‌شود. از آنجا که تاکنون سازوکاری جهت تحلیل احتراق لجن نفتی ارائه نشده است، در این تحقیق از سازوکار پیشنهاد شده برای احتراق زغال‌سنگ استفاده می‌شود. در این حالت معادلات انتقال حرارت و جرم برای ذره شامل شش مرحله می‌شوند [۱۰]:  
 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.

۱-۲- گرم شدن و سرد شدن ذره

با ورود ذره به کوره دمای آن شروع به افزایش می‌کند و تا زمان رسیدن آن به دمای جوش ادامه می‌یابد. سرد شدن ذره هم پس از احتراق کلیه مواد قابل احتراق موجود در ذره و باقی ماندن خاکستر اتفاق می‌افتد. در این دو مرحله هیچ‌گونه انتقال جرمی صورت نمی‌گیرد و ذره با مکانیزم‌های انتقال حرارت هدایت، جابجایی و تشعشع با محیط پیرامونش تبادل حرارت دارد. به دلیل کوچک بودن قطر ذرات و با فرض سیستم فشرده<sup>۳</sup> (از آنجایی که عدد بیو<sup>۴</sup> کمتر از ۰.۱ است) از انتقال حرارت درون ذرات صرف‌نظر می‌شود. در این صورت معادله‌ی انتقال حرارت برای ذره را می‌توان به‌صورت 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،  $\theta_R$  دمای تشعشع است. ضریب انتقال حرارت جابجایی  $h$  نیز با استفاده از رابطه‌ی رانز-مارشال<sup>۵</sup> به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

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

به‌طوری‌که  $K_\infty$  ضریب انتقال حرارت هدایت فاز پیوسته،  $Re_d$  رینولدز به‌دست آمده بر اساس قطر و سرعت ذره و  $Pr$  عدد پرائنتل می‌باشد [۲۲].

۲-۲- تبخیر و جوشش رطوبت

زمانی که دمای ذره به دمای تبخیر  $T_{vap}$  می‌رسد، تبخیر رطوبت آغاز می‌شود 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 گرادپان غلظت بخار بین سطح ذره و گاز بستگی دارد [۱۰]:

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

که  $N_i$  شار مولی بخار،  $k_c$  ضریب انتقال جرم و  $C_{i,s}$  غلظت بخار بر روی سطح است که با فرض برابری فشار جزئی بخار در سطح مشترک با فشار اشباع بخار در دمای ذره به دست می‌آید و  $C_{i,\infty}$  غلظت بخار در گاز است که با حل معادله‌ی بقای گونه‌ها برای گونه‌ی  $i$  قابل محاسبه است. همچنین ضریب انتقال جرم از رابطه‌ی عدد شرود<sup>۶</sup> محاسبه می‌شود. جرم ذره نیز به صورت رابطه‌ی زیر کاهش می‌یابد:

$$m_p(t+\Delta t) = m_p(t) - N_i A_p M_{w,i} \Delta t \quad (4)$$

که  $M_{w,i}$  جرم مولکولی گونه‌ی  $i$  است. در نهایت دمای قطره (ذره) با انجام موازنه‌ی دمایی میان تغییرات دمای محسوس در قطره با انتقال حرارت جابه جایی و نهان میان قطره و فاز پیوسته به صورت زیر به‌دست می‌آید [۱۰]:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) - \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (5)$$

که  $h_{fg}$  گرمای نهان تبخیر آب است.

جوشش قطرات هنگامی اتفاق می‌افتد که دمای قطره به دمای جوشش می‌رسد و همچنین جرم قطره بیشتر از کسر بخار نشدنی می‌شود. در این حالت جوشش همرفتی فاز مجزا از معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود [۲۳].

$$\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{4k_\infty}{\rho_p c_{p,\infty} d_p} (1 + 0.23 \sqrt{Re_d}) \ln \left[ 1 + \frac{c_{p,\infty} (T_\infty - T_p)}{h_{fg}} \right] \quad (6)$$

به‌طوری‌که  $\rho_p$  چگالی قطره و  $c_{p,\infty}$  ظرفیت حرارتی گاز،  $k_\infty$  ضریب هدایت حرارتی گاز است. در حین جوشش فرض می‌شود دمای قطره ثابت است. گرمای لازم جهت تبخیر رطوبت به‌صورت منفی در معادله‌ی انرژی فاز پیوسته ظاهر می‌شود.

۲-۳- آزاد شدن و احتراق گازهای فرار

آزاد شدن گازهای فرار زمانی اتفاق می‌افتد که دمای ذرات از دمای تبخیر بالاتر می‌رود و جرم ذره از جرم مواد غیر فرار بیشتر می‌شود. گازهای فرار ترکیبی از گازهای  $\text{CO}$ ،  $\text{CO}_2$ ،  $\text{CH}_4$ ،  $\text{C}_3\text{H}_8$ ،  $\text{H}_2$  و گازهای غیر ارگانیک دیگر است که از ذرات سوخت جامد آزاد می‌شوند. آزاد شدن گازهای فرار فرآیند 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 پژوهش با

<sup>1</sup> Sludge Oil Derived Fuel

<sup>2</sup> Discrete Random Walk Model

<sup>3</sup> Lumped System

<sup>4</sup> Biot Number

<sup>5</sup> Ranz-Marshall

<sup>6</sup> Sherwood number

که در آن  $A_p$  مساحت سطح قطره و برابر با  $\pi d_p^2$  می‌باشد و  $p_{Ox}$  فشار جزئی گونه‌های اکسیدکننده در گاز اطراف ذرات احتراقی است. ضریب نرخ نفوذ اکسیدکننده  $D_0$  و نرخ سینتیک واکنش سطحی  $R$  نیز به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۲۲]:

$$D_0 = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0.75}}{d_p} \quad (۱۳)$$

$$R = C_2 e^{-(E/RT_p)} \quad (۱۴)$$

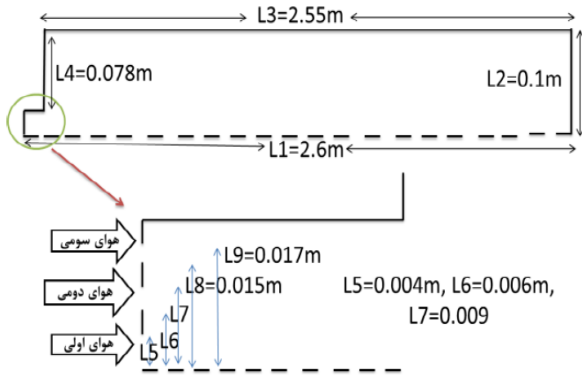
که ضرایب  $C_1$ ،  $C_2$  و  $E$  نیز در جدول (۱) داده شده‌اند.

جدول (۱) ضرایب معادلات تبخیر مواد فرار و احتراق مواد نیم سوز [۱۱]

آزاد شدن مواد فرار	احتراق مواد نیم سوز
$A_1$ $3.15 \times 10^6$	$C_1$ $5 \times 10^{-12}$
$E$ $(j/kg.mol)$ $7.4 \times 10^7$	$C_2$ $6.7$
	$E$ $(j/kg.mol)$ $1.38 \times 10^8$

۲-۵- هندسه مساله و روش حل عددی

هندسه کوره مورد مطالعه در این تحقیق، هندسه استفاده شده در پژوهش آگرانپوس [۲۵] و همچنین کارگر [۱۱] است که ابعاد و جزئیات آن در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) ابعاد کوره مورد مطالعه و جزئیات آن [۱۱]

مدل سازی کوره به صورت دو بعدی با تقارن محوری انجام شده است. این محفظه دارای سه ورودی است که از ورودی اول سوخت و هوا وارد می‌شود و از دو ورودی دیگر فقط هوا وارد می‌شود. شرایط هوای ورودی در جدول (۲) آورده شده است. هوا به صورت ۲۱ درصد اکسیژن و ۷۹ درصد نیتروژن در نظر گرفته می‌شود. شرایط مرزی در ورودی‌ها به صورت سرعت ورودی<sup>۴</sup> و در خروجی به صورت فشار خروجی با فشار نسبی صفر در نظر گرفته می‌شود. از شرط عدم لغزش برای سرعت و از شرط مرزی دما ثابت بر روی دیواره‌ها استفاده شده است.

جدول (۲) شرایط هوای ورودی به کوره [۱۱]

$U_1$ (m/s)	۸,۳۶۶
$U_2$ (m/s)	۴,۴۷۵
$U_3$ (m/s)	۳,۰۹۳
$T_{1,2,3}$ (K)	۳۷۳

توجه به عدم اطلاع از ساختار مولکولی و شیمیایی لجن نفتی از مدل تجربی سینتیک تک نرخ<sup>۱</sup> که برای آزاد شدن گازهای فرار زغال سنگ ارائه شده‌اند استفاده می‌شود. این مدل پیش‌تر نیز جهت شبیه‌سازی احتراق زیست‌توده‌ها و سایر سوخت‌های جامد مانند RDF و SRF نیز استفاده شده است [۱۰-۱۱ و ۱۶]. در این مدل فرض می‌شود نرخ آزاد شدن گازهای فرار از مرتبه‌ی اول است و با میزان گازهای فرار موجود در ذره ارتباط دارد که به صورت رابطه‌ی (۷) بیان می‌شود [۱۷]:

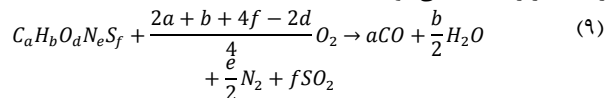
$$-\frac{dm_p}{dt} = k[m_p - (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0}] \quad (۷)$$

در این رابطه  $k$  نرخ سینتیک است و توسط رابطه‌ی آرنیوسی زیر به دما مربوط می‌شود:

$$k = A_1 e^{-\frac{E}{RT}} \quad (۸)$$

که  $R$  ثابت جهانی گازها است. ضرایب انرژی فعال سازی  $E$  و ضریب پیش نمایی  $A_1$  در جدول (۱) آورده شده‌اند.

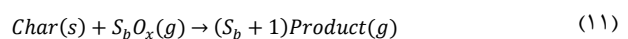
از آنجایی که ترکیب دقیق گازهای فرار آزاد شده از لجن نفتی در دسترس نیست، این گازها به صورت یک گونه مصنوعی  $C_a H_b O_d N_e S_f$  در نظر گرفته می‌شوند که  $a, b, d, e, f$  از آنالیز نهایی و تقریبی سوخت به دست می‌آیند. همچنین برای شبیه‌سازی احتراق گازهای فرار از واکنش دو مرحله‌ای زیر استفاده می‌شود [۲۴]:



به دلیل عدم وجود مکانیزم شیمیایی برای گونه مصنوعی فوق می‌توان با فرض شیمی سریع از تاثیر سینتیک شیمیایی صرف نظر کرد و از مدل اضمحلال گردابه‌ها<sup>۲</sup> (EDM) که برای این منظور ارائه شده است، جهت مدل سازی احتراق استفاده نمود.

۲-۴- احتراق مواد نیم سوز

هنگامی که آزاد شدن گازهای فرار به پایان رسید، مواد نیم سوز که از کربن و خاکستر تشکیل شده‌اند و دارای سطح متخلخلی می‌باشند باقی می‌مانند (وجود تخلخل در سطح ذره به نفوذ اکسیژن در ذره کمک می‌کند). در این زمان مواد نیم سوز شروع به انجام واکنش‌های سطحی با گازهای اکسیدکننده پیرامون خود نظیر  $O_2$  می‌نمایند. این واکنش‌ها تا زمان سوختن تمام مواد قابل احتراق ادامه می‌یابد. واکنش ناهمگن مواد نیم سوز را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت که  $S_b$  جرم اکسیدکننده در واحد جرم مواد نیم سوز است [۲۳]:



دو عامل اصلی نرخ انجام واکنش میان اکسیدکننده و مواد نیم سوز را کنترل می‌کند: نفوذ اکسیدکننده به سطح ذره و سینتیک احتراق. به همین دلیل در این تحقیق از مدل سینتیک-نفوذ<sup>۳</sup> استفاده می‌شود که فرض می‌کند واکنش سطحی توسط هر دو عامل نفوذ اکسیدکننده و نرخ سینتیک کنترل می‌شود و به صورت رابطه‌ی (۱۲) بیان می‌شود:

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p p_{ox} \frac{D_0 R}{D_0 + R} \quad (۱۲)$$

<sup>1</sup> The Single Kinetic Rate Model

<sup>2</sup> Eddy Dissipation Model

<sup>3</sup> The Kinetic/Diffusion Surface Reaction Rate Model

<sup>4</sup> Velocity Inlet

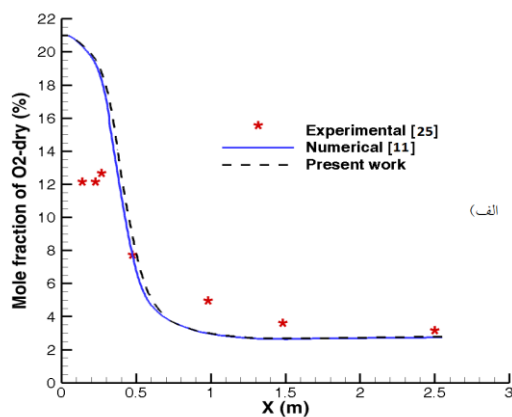
۹۹،۹۷ می‌باشد. با توجه به مقادیر گزارش شده نسبت جرمی هوا به سوخت در حدود ۷،۳۴ برآورد می‌شود.

جهت بررسی استقلال حل از شبکه از سه شبکه با تعداد ۸۸۰۰ سلول، ۳۲۲۰۰ سلول و ۶۳۴۷۰ سلول سازمان یافته استفاده شده است. بررسی بر روی درصد کسر مولی دی اکسید کربن و اکسیژن بر روی محور تقارن نشان داد که با شبکه ۳۲۲۰۰ سلولی حل از شبکه مستقل شده و ریزتر کردن شبکه تاثیری در نتایج حاصله ندارد.

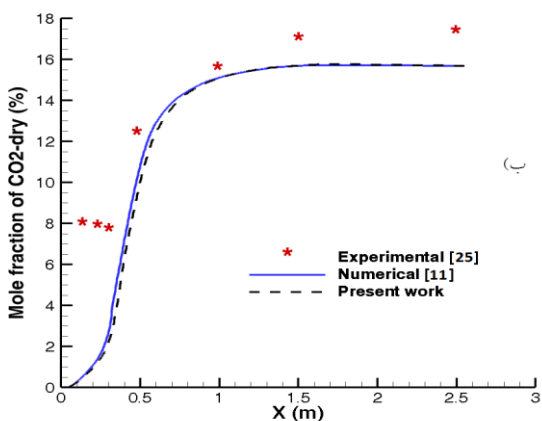
۳-۱- اعتبار سنجی نتایج

جهت اعتبارسنجی، نتایج شبیه‌سازی احتراق RDF با نتایج تجربی موجود در تحقیق آگرانیوس [۲۵] در آزمایشگاه دیگ بخار و نیروگاه حرارتی دانشگاه آتن و همچنین نتایج عددی کاردرگر [۱۱] مقایسه شدند. نتایج تجربی تنها در دو مورد درصد کسر مولی اکسیژن و دی‌اکسیدکربن در مخلوط خشک بر روی محور تقارن موجود بود، بنابراین صحت‌سنجی نتایج تنها در این دو مورد انجام شد. درصد مولی یک گونه در مخلوط خشک به صورت رابطه‌ی (۱۵) تعریف می‌شود:

$$\% X_{i,dry} = \frac{x_i}{1-x_{H_2O}} \times 100 \quad (15)$$



(الف)



(ب)

شکل (۲) اعتبار سنجی نتایج برای الف) درصد کسر مولی اکسیژن و ب) درصد کسر مولی دی‌اکسیدکربن، در مخلوط خشک بر روی محور تقارن

شکل (۲) الف) درصد کسر مولی اکسیژن در مخلوط خشک بر روی محور تقارن را نشان می‌دهد؛ همان‌طور که انتظار می‌رود با فاصله گرفتن از ورودی و کامل شدن احتراق، اکسیژن موجود در طول محفظه مصرف شده و میزان آن کاهش می‌یابد. در شکل (۲) ب) درصد کسر مولی دی‌اکسیدکربن در

به‌منظور گسسته‌سازی جمله‌های جابه‌جایی در معادلات ممنتوم، انرژی، آشفستگی و گونه‌ها از روش پادباسو مرتبه دوم به دلیل دقت بالای آن استفاده شده است. همچنین برای حل مشکل جفت شدگی میدان‌های فشار و سرعت نیز از روش سیمپل<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. جهت به‌دست آوردن حدس اولیه مناسب از میدان جریان، ابتدا جریان به‌صورت غیر واکنشی<sup>۲</sup> حل می‌شود و پس از حل میدان جریان، در ادامه مدل‌های احتراقی فعال می‌شوند.

۳- نتایج و بحث

جهت اعتبار سنجی نتایج حاضر ابتدا کوره مورد مطالعه با مشخصات سوخت RDF، استفاده شده در تحقیق آگرانیوس [۲۵] و کاردرگر [۱۱] شبیه‌سازی شد. ذرات از ورودی شماره یک تزریق می‌شوند. توزیع ذرات سوخت بر مبنای رابطه روزین-رامر<sup>۳</sup> در نظر گرفته شده است که جزئیات آن به همراه شرایط اولیه سوخت RDF در جدول (۳) آورده شده است. آنالیز نهایی و تقریبی ذرات نیز در جدول (۴) ذکر شده است.

جدول (۳) شرایط اولیه ذرات سوخت RDF ورودی به کوره [۱۱]

حداقل قطر (m)	$5 \times 10^{-6}$	چگالی $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	۸۰۰
حداکثر قطر (m)	$10^{-3}$	گرمای ویژه $\left(\frac{kJ}{kg.K}\right)$	۱۲۲۰
قطر متوسط (m)	$2.96 \times 10^{-4}$	سرعت $\left(\frac{m}{s}\right)$	۵،۴۹
پارامتر پراکنگی	۱،۳۲	دما (K)	۳۷۳
تعداد قطرها	۴۰	دبی جرمی (kg/s)	$2.131 \times 10^{-4}$

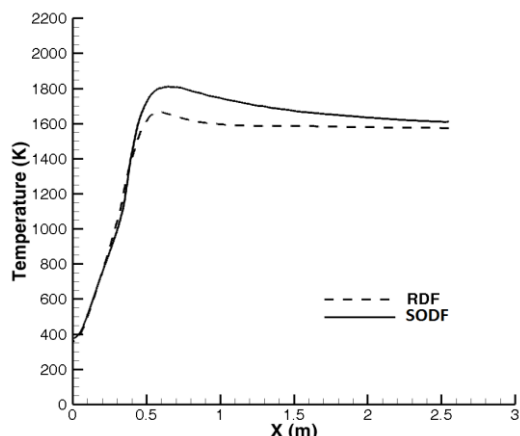
جدول (۴) آنالیز تقریبی و نهایی ذرات RDF [۱۱]

آنالیز نهایی (درصد وزنی)	آنالیز تقریبی (درصد وزنی سوخت خشک عاری از خاکستر <sup>۴</sup> DAF)
درصد جرمی کربن	۵۷،۱
درصد جرمی هیدروژن	۵
درصد جرمی اکسیژن	۲۳،۶۸
درصد جرمی نیتروژن	۰،۵۲
درصد جرمی گوگرد	۱۶،۸۳
	ارزش حرارتی (MJ/kg)
	۶
	۸۲
	۱۱،۸
	۰،۲
	۱۶،۸۳

گازهای فرار نیز به‌صورت یک گونه مصنوعی با فرمول شیمیایی  $C_{3/6.5} H_{9/18.7} O_{2/19.26}$  در نظر گرفته شد که جرم مولی آن (g/mol)

<sup>1</sup> SIMPLE  
<sup>2</sup> Cold flow  
<sup>3</sup> Rosin-Rammler  
<sup>4</sup> Dry Ash Free

است (۲۴٫۲ درصد برای لجن نفتی و ۱۱٫۸ درصد برای RDF) و از آنجایی که کربن ثابت به طور مستقیم در واکنش شرکت می کند حرارت بیش تری تولید می نماید و دمای احتراق بالاتر می رود.



شکل (۳) مقایسه میان تغییرات دما بر روی محور تقارن برای دو سوخت RDF و لجن نفتی پالایشگاهی

در شکل (۴) الف مقایسه ای میان تغییرات کسر مولی دی اکسید کربن بر روی محور تقارن برای دو سوخت RDF و لجن نفتی انجام شده است. همان طور که مشاهده می شود با فاصله گرفتن از ورودی کسر مولی  $CO_2$  افزایش می یابد که به دلیل انجام احتراق و تولید  $CO_2$  می باشد. شیب افزایش دی اکسید کربن در ورودی برای RDF بیش تر از لجن نفتی پالایشگاهی است که به دلیل بیش تر بودن درصد جرمی مواد فرار در RDF نسبت به لجن نفتی پالایشگاهی، در آنالیز نهایی این دو سوخت می باشد. این موضوع باعث می شود که مواد فرار بیش تری آزاد شوند و احتراق سریع تر اتفاق بی افتد. همچنین در خروجی کوره، کسر مولی دی اکسید کربن برای لجن نفتی کم تر از RDF است که به دلیل کم تر بودن درصد جرمی کربن در آنالیز نهایی لجن نفتی پالایشگاهی نسبت به RDF است (۴۲٫۶۹ درصد برای لجن نفتی و ۵۷٫۱ درصد برای RDF)، زیرا که هر چه میزان کربن موجود در سوخت بیش تر باشد، کربن بیش تری با اکسیژن واکنش می دهد و دی اکسید کربن بیش تری تولید می شود [۲۷].

در شکل (۴) ب مقایسه ای میان تغییرات کسر مولی اکسیژن بر روی محور تقارن برای دو سوخت RDF و لجن نفتی پالایشگاهی نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود با فاصله گرفتن از ورودی کسر مولی اکسیژن در هر دو سوخت کاهش می یابد که به دلیل انجام احتراق و مصرف شدن اکسیژن است. شیب این تغییرات در ورودی کوره برای RDF بیش تر از لجن نفتی پالایشگاهی است که همان طور که پیش تر اشاره شد به دلیل بیش تر بودن درصد جرمی مواد فرار در RDF نسبت به لجن نفتی پالایشگاهی، در آنالیز نهایی این دو سوخت می باشد؛ که باعث می شود مواد فرار بیش تری آزاد شوند و احتراق سریع تر اتفاق بی افتد. در انتهای کوره نیز کسر مولی اکسیژن برای لجن نفتی پالایشگاهی نسبت به RDF بیش تر است که به دلیل وجود اکسیژن بیش تر در آنالیز نهایی لجن نفتی نسبت به RDF است که باعث می شود مقداری از اکسیژن موجود در سوخت در احتراق شرکت کرده و باعث شود مقدار کم تری از اکسیژن موجود در هوا مصرف شود [۲۷] و به همین دلیل در انتهای کوره کسر مولی اکسیژن برای

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 گذشته داشتند که صحت مدل شبیه سازی شده را تأیید می نماید. البته نتایج عددی مرجع [۱۱] و نتایج عددی حاضر در ابتدای کوره پیش بینی های دقیقی را به دست ندهاند. به نظر می رسد آزاد سازی مواد فرار و شروع واکنش ها در مدل های عددی با تأخیر بیشتری نسبت به واقعیت پیش بینی شده اند. برای بررسی این موضوع مطالعات پارامتری بر روی ضرایب موجود در مدل های عددی انجام شده است که شرح آن در مراجع [۲۵] و [۲۶] آورده شده است.

۲-۳- احتراق سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی و مقایسه با سوخت

#### RDF

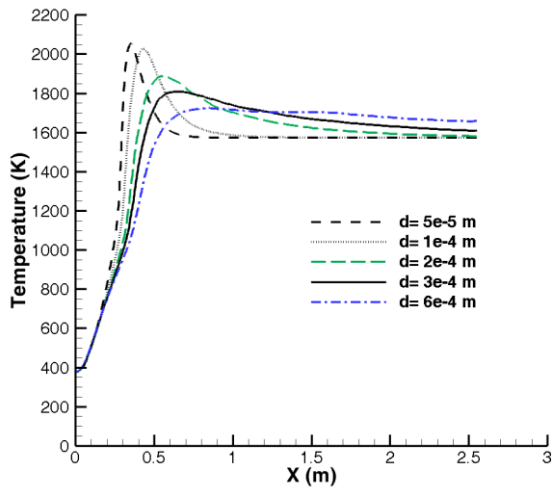
لجن نفتی مورد مطالعه در این پژوهش، لجن حاصل از پالایشگاه اصفهان است که در تحقیق ناظم و توکلی [۱] استفاده شده است. آنالیز تقریبی و نهایی این سوخت بر مبنای سوخت خشک عاری از خاکستر (DAF) به صورت جدول (۵) گزارش شده است. همان طور که در جدول ملاحظه می شود لجن نفتی سوختی با ارزش حرارتی پایین است که دارای رطوبت بسیاری است (۹۲٫۶۲ درصد از وزن کل)، به همین سبب ابتدا لجن نفتی در یک اجاق آزمایشگاهی حرارت داده می شود تا رطوبت آن کاملاً گرفته شود. جهت مقایسه میان دو سوخت RDF و سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی (SODF)، احتراق لجن نفتی با مشخصات ذکر شده بر اساس توزیع ذرات رزین راملر که در جدول (۳) آورده شده است، بررسی می گردد. شرایط هوای ورودی نیز به صورت جدول (۲) در نظر گرفته می شود. چگالی ذره SODF،  $989 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$  و گرمای ویژه آن  $1184 \left(\frac{kJ}{kg.K}\right)$  می باشد. گونه مصنوعی گازهای فرار سوخت SODF هم با توجه به آنالیز تقریبی و نهایی آن به صورت  $C_{11.4}H_{7.93}O_{4.35}N_{0.4297}S_{1.0573}$  در نظر گرفته می شود که دارای جرم مولی  $99.381 \text{ (g/mol)}$  می باشد و از واکنش دو مرحله ای مطابق رابطه های (۱۳) و (۱۴) پیروی می کند.

جدول (۵) آنالیز تقریبی و نهایی سوخت مشتق شده از لجن نفتی پالایشگاهی [۱]

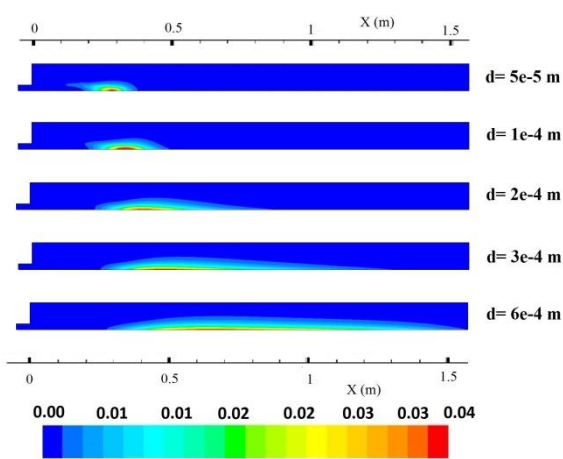
آنالیز نهایی (درصد وزنی)	آنالیز تقریبی (درصد وزنی (DAF))
درصد جرمی کربن	۴۲٫۶۹
درصد جرمی هیدروژن	۵٫۳۵
درصد جرمی اکسیژن	۴۶٫۶۱
درصد جرمی نیتروژن	۴٫۱۲
درصد جرمی گوگرد	۱٫۲۳
	درصد جرمی رطوبت
	درصد جرمی مواد فرار
	درصد جرمی کربن ثابت
	درصد جرمی خاکستر
	ارزش حرارتی (MJ/kg)

در شکل (۳) مقایسه ای میان تغییرات دما بر روی محور تقارن برای دو سوخت RDF و لجن نفتی پالایشگاهی انجام شده است. با وجود این که لجن نفتی دارای ارزش حرارتی کم تری نسبت به RDF است ولی بیشینه دمای آن بیش تر است که می توان علت آن را به عدم وجود رطوبت در لجن نفتی نسبت داد؛ زیرا که رطوبت موجود در سوخت مقدار زیادی از حرارت تولیدی حاصل از واکنش را جذب می کند تا تبخیر شود. همچنین درصد کربن ثابت در سوخت مشتق شده از لجن نفتی پالایشگاهی بیش تر

با کاهش قطر ذرات زغال سنگ دمای بالاتری درون کوره ایجاد می‌شود. هلمتر و همکاران [۲۹] نیز با احتراق هم‌زمان زغال سنگ و خاک اره، نشان دادند با افزایش قطر ذرات طول ناحیه دما بالای شعله کاهش می‌یابد. در تحقیق دیگری الفاساخانی و همکاران [۱۲] یک مطالعه عددی و تجربی بر روی چوب پودر شده انجام دادند و مشاهده کردند اگر اندازه ذرات بزرگ باشد یا سرعت جریان زیاد باشد واکنش‌های اکسیداسیون به سمت خروجی کوره نزدیک می‌شوند، از این رو اکسیداسیون ناقص رخ می‌دهد که در مراجع دیگری نیز نتایج مشابهی گزارش شده است [۸ و ۱۰]. کاردرگر [۱۱] نیز نشان داد با افزایش قطر ذرات RDF بیشینه‌ی دما کاهش یافته و ناحیه دما بالا از ورودی فاصله می‌گیرد.



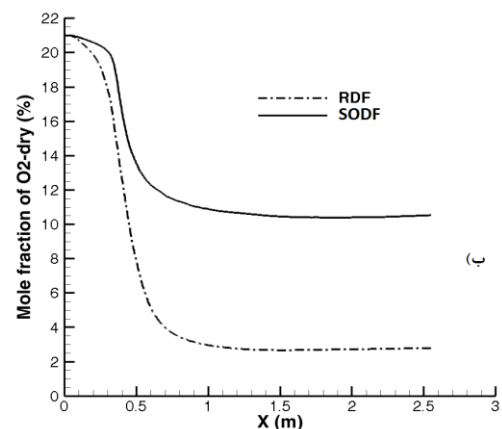
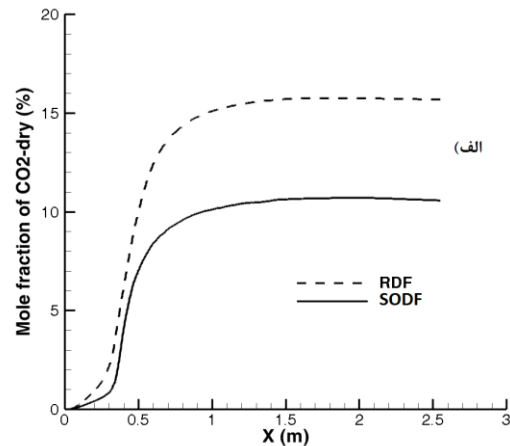
شکل (۵) نمودار دما بر روی محور تقارن برای ذرات با قطرهای مختلف



شکل (۶) کانتور کسر جرمی گازهای فرار برای ذرات با قطرهای مختلف

در شکل (۶) کانتور کسر جرمی گازهای فرار برای ذرات با قطرهای مختلف نشان داده شده است. با افزایش قطر ذره، جرم ذره افزایش می‌یابد و با توجه به معادله‌ی (۵) نرخ افزایش دمای ذره کاهش می‌یابد در نتیجه ذرات مسیر بیشتری طی می‌کنند تا به دمای مشخصی برسند، بنابراین ذرات با قطر بزرگ‌تر در یک مکان مشخص دمای کم‌تری خواهند داشت به همین دلیل نرخ آزاد شدن گازهای فرار که به دما بستگی دارد نیز کاهش می‌یابد. از طرفی طول ناحیه‌ای که این گازها آزاد می‌شوند کشیده‌تر می‌شود. این مسئله باید در طراحی کوره‌ها مورد توجه قرار گیرد؛ به این صورت که ذرات

لجن نفتی بیش‌تر شود. بر این اساس به نظر می‌رسد که سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی به میزان هوادهی کمتری برای انجام احتراق نیاز داشته باشد.

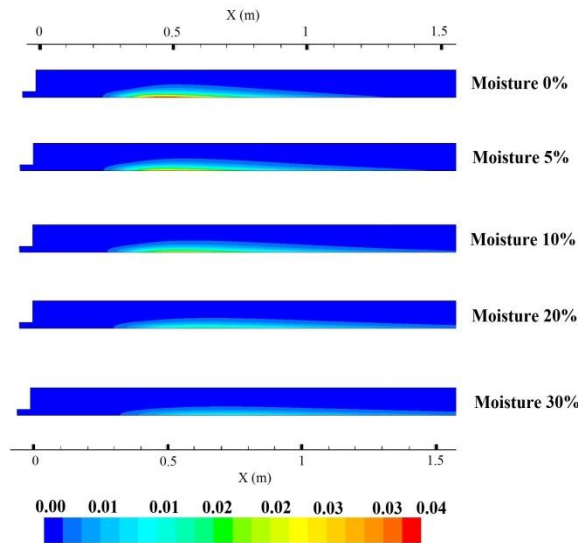


شکل (۴) مقایسه میان تغییرات الف) کسر مولی دی اکسیدکربن ب) کسر مولی اکسیژن، بر روی محور تقارن برای دو سوخت RDF و لجن نفتی پالایشگاهی

۳-۳- بررسی تاثیر قطر ذرات بر روی احتراق سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی

اندازه ذرات سوخت پودر شده تاثیر 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 نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش قطر ذرات بیشینه‌ی دما کاهش می‌یابد، زیرا که با افزایش قطر ذرات، میزان کربن نسوخته که در اثر عدم واکنش آن‌ها با اکسیژن است، افزایش می‌یابد و به همین علت در اثر عدم سوختن کامل همه‌ی کربن موجود در سوخت، بیشینه‌ی دما کاهش می‌یابد. مقدار بیشینه‌ی دما برای ذره‌ی با قطر  $5 \times 10^{-5}$  متر برابر با  $2042$  کلوین و برای ذره‌ی با قطر  $6 \times 10^{-4}$  متر برابر با  $1754$  کلوین به دست آمد. همچنین مکان بیشینه‌ی دما نیز با افزایش قطر ذرات از ورودی کوره فاصله می‌گیرد؛ زیرا که با افزایش قطر ذرات زمان مورد نیاز جهت آزاد شدن گازهای فرار بیش‌تر می‌شود و به همین علت احتراق دیرتر رخ می‌دهد. این مکان برای ذره‌ی با قطر  $5 \times 10^{-5}$  متر در فاصله‌ی  $35$  سانتی‌متری و برای ذره‌ی با قطر  $6 \times 10^{-4}$  در فاصله‌ی  $75$  سانتی‌متری از ورودی کوره مشاهده می‌شود. این موضوع در تحقیقات پیشین نیز بررسی و تایید شده است. لیاکوس و همکاران [۲۸] نشان دادند

آب، دمای گازها دیرتر افزایش می‌یابد و آزاد شدن گازهای فرار و شروع احتراق با تاخیر اتفاق می‌افتد و وسعت محدوده‌ی آزاد شدن گازهای فرار نیز نسبت به حالت عدم وجود رطوبت افزایش می‌یابد؛ بنابراین زمان ماند نیز افزایش می‌یابد و به کوره‌ای با طول بیشتر نیاز خواهد بود. بررسی میزان رطوبت در تحقیق کاردگر [۱۱] نیز انجام شده است که نتایج گزارش شده در آن، صحت نتایج به دست آمده در کار حاضر را تایید می‌نماید.



شکل (۸) کانتورهای کسر جرمی گازهای فرار برای احتراق سوخت با درصدهای رطوبت مختلف

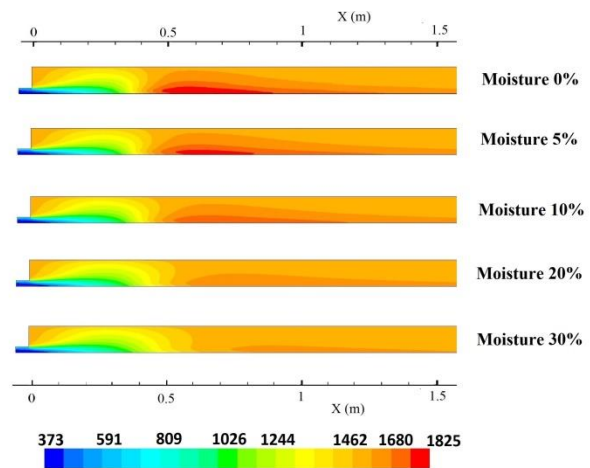
#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش احتراق لجن‌نفتی پالایشگاهی به عنوان یک راهکار جهت مدیریت این پسماند که خطرات بالقوه‌ی زیست محیطی به همراه دارد، بررسی شد. در مقایسه میان خواص احتراقی SODF و RDF، مشاهده شد که با وجود ارزش حرارتی پایین‌تر SODF بیشینه‌ی دمای آن بر روی خط مرکزی کوره بیشتر است. این موضوع می‌تواند به علت عدم وجود رطوبت در SODF مورد مطالعه و دارا بودن درصد جرمی کربن ثابت بالاتر نسبت داد. با افزایش محتوای رطوبت SODF مورد بررسی این استدلال مورد تأیید قرار گرفت. قطر ذرات و تأثیر آن بر احتراق عامل دیگری بود که مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد با کاهش قطر ذرات بیشینه‌ی دما افزایش می‌یابد. مقدار بیشینه‌ی دما برای ذره‌ای با قطر  $5 \times 10^{-5}$  متر برابر با  $2042$  کلوین و در فاصله‌ی ۳۵ سانتی‌متری از ورودی کوره و برای ذره‌ای با قطر  $6 \times 10^{-4}$  متر برابر با  $1754$  کلوین و در فاصله‌ی ۷۵ سانتی‌متری از ورودی کوره به دست آمد. همچنین مطالعه‌ای بر روی تأثیر رطوبت موجود در سوخت بر روی خواص احتراقی انجام شد که نشان داد افزایش رطوبت موجب کاهش بیشینه‌ی دما می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش ۳۰ درصدی جرم رطوبت در آنالیز تقریبی سوخت بیشینه‌ی دما حدود ۱۱ درصد کاهش یافت. 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 به دست آورد و از ارزش حرارتی لجن‌نفتی به نحو مطلوب استفاده کرد.

سوخت بزرگ‌تر زمان ماند بیشتری نیاز دارند و در فاصله دورتری از ورودی احتراق آن‌ها کامل می‌شود، به همین سبب کوره‌ی بزرگ‌تری نیز مورد نیاز خواهد بود. در تحقیق کاردگر [۱۱] نیز کاهش نرخ آزاد شدن گازهای فرار با افزایش قطر مشاهده شد.

۳-۴ بررسی تاثیر 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 سوخت‌ها می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شده لجن نفتی پالایشگاهی حاضر دارای درصد بالایی رطوبت است؛ به همین جهت 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 لجن‌نفتی 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، بیشینه‌ی دما کاهش می‌یابد؛ این مقدار برای سوخت بدون رطوبت برابر ۱۸۲۵ کلوین و برای سوخت با رطوبت ۳۰ درصد، ۱۶۲۸ کلوین می‌باشد؛ که به دلیل افزایش کسر جرمی بخار آب و همچنین کاهش درصد جرمی مواد قابل احتراق می‌باشد. همچنین از آن جایی 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 یک فرآیند گرماگیر می‌باشد و حرارت زیادی صرف تبخیر رطوبت می‌شود، در نتیجه بیشینه‌ی دما کاهش می‌یابد.



شکل (۷) کانتورهای دما برای احتراق سوخت با درصدهای رطوبت مختلف

در شکل (۸) کانتور کسر جرمی گازهای فرار برای احتراق سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی با درصدهای رطوبت مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش رطوبت کسر جرمی گازهای فرار آزاد شده کاهش می‌یابد که به دلیل کاهش کسر جرمی این گازها در آنالیز تقریبی سوخت به واسطه‌ی اضافه شدن رطوبت می‌باشد. بیشینه کسر جرمی گازهای فرار برای سوخت با رطوبت صفر درصد، حدود ۰.۳۸ و برای سوخت با رطوبت ۳۰ درصد، به میزان ۰.۱۱ می‌رسد. همان‌طور که اشاره شد به دلیل بالا رفتن ظرفیت حرارتی مخلوط به دلیل وجود گونه‌ی بخار

## تشکر و قدردانی

در پایان از راهنمایی‌های ارزشمند جناب آقای دکتر کاردگر در زمینه مدل‌سازی عددی سوخت جامد تشکر می‌نمایم. همچنین از جناب آقایان دکتر ناظم و دکتر توکلی که نتایج آزمایش‌های خود بر روی لجن نفتی پالایشگاهی را در اختیار اینجانبان قرار دادند، سپاسگزاری می‌کنیم.

## فهرست علائم

$A$	مساحت سطحی، $m^2$
$A_r$	ضریب پیش‌نمایی
$C$	غلظت، $mol.m^{-3}$
$C_p$	ضریب گرمای ویژه، $kJ/kg.K$
$D$	ضریب نفوذ گونه، $m^2.s^{-1}$
$E$	انرژی فعال‌سازی، $J/kmol$
$f$	کسر مخلوط
$h$	آنتالپی، $J$
$K$	ضریب هدایت حرارتی، $W/m.K$
$k$	نرخ سینتیک، $kg/m^3/s$
$M$	جرم، $kg$
$Nu$	عدد ناسلت
$P$	فشار، $Pa$
$Pr$	عدد پرانتل
$R$	ثابت جهانی گازها، $J/kmol$
$Re$	عدد رینولدز
$T$	دما، $K$
$t$	زمان، $s$
$X$	کسر مولی

## فهرست علائم یونانی

$\varepsilon$	اضمحلال انرژی جنبشی
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
$\tau$	تنش برشی، $Pa$
$\sigma$	ثابت استفان بولتزمن، $J.s^{-1}.m^{-2}.K^{-4}$
$R$	نرخ سینتیک، $kg/m^3/s$
$\pi$	عدد پی
$\theta$	دمای تشعشع، $K$

## زیر نویس‌ها

$i$	گونه $i$
$p$	ذره
$fg$	گرمای نهان
$r$	تشعشع
$v$	گازهای فرار
$vap$	بخار آب
$w$	آب
$\infty$	فاز پیوسته

## مراجع

- 1- Nazem, M.A., Tavakoli, O., 2017, "Bio-oil production from refinery oily sludge using hydrothermal liquefaction technology", *The Journal of Supercritical Fluids*, **127**, 33-40.
- 2- Leckner, B., Amand, L. E., Lücke, K., Werther, J., 2004, "Gaseous emissions from co-combustion of sewage sludge and coal/wood in a fluidized bed", *Fuel*, **83**, 477-486.
- 3- Malkow, T., 2004, "Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal", *Waste Manage*, **24**, 53-79.
- 4- Stasta, P., Boran, J., Bebar, L., Stehlik, P., Oral, J., 2006, "Thermal processing of sewage sludge", *Applied Thermal Engineering*, **26**, 1420-1426.
- 5- Molcan, P., Lu, G., Bris, T. L., Yan, Y., Taupin, B., Caillat, S., 2009, "Characterization of biomass and coal co-firing on a 3 MWth Combustion Test Facility using flame imaging and gas/ash sampling techniques", *Fuel*, **88**, 2328-2334.
- 6- Bhuiyan, Naser, J., 2015, "Computational modeling of co-firing of biomass with coal under oxy-fuel condition in a small scale furnace", *Fuel*, **143**, 455-466.
- 7- Lu, L., Ismail, T.M., jin, Y., El-Salam, M., Yoshikawa, K., 2016, "Numerical and experimental investigation on co-combustion characteristics of hydrothermally treated municipal solid waste with coal in a fluidized bed", *Fuel Processing Technology*, **154**, 52-65.
- 8- Weber, R., Kupka, T., Zaja, K., 2009, "Jet flames of a refuse derived fuel", *Combustion and Flame*, **156**, 922-927.
- 9- Lu, H., Ip, E., Scott, J., Foster, P., Vickers, M., Baxter, L. L., 2010, "Effects of particle shape and size on devolatilization of biomass particle", *Fuel*, **89**, 1156-1168.
- 10- Agraniotis, M., Nikolopoulos, N., Grammelis, P., Kakaras, E., 2010, "Numerical investigation of solid recovered fuels' co-firing with brown coal in large scale boilers-evaluation of different co-combustion modes", *Fuel*, **89**, 3693-3709.
- 11- امین کاردگر، ۱۳۹۱، شبیه‌سازی احتراق سوخت‌های مشتق شده از زباله (RDF) به منظور بررسی پارامترهای احتراقی آنها، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه تربیت مدرس.
- 12- Elfasakhany, L. Tao, B. Espenas, J. Larfeldt, X.S. Bai, 2013, "Pulverised wood combustion in a vertical furnace: Experimental and computational analyses", *Applied Energy*, **112**, 454-464.
- 13- Pallares, J., Gil, A., Cortes, C., Herce, C., 2009, "Numerical study of co-firing coal and cynara cardunculus in a 350 MWe utility boiler", *Fuel Processing Technology*, **90**, 1207-1213.
- 14- Ma, L., Jones, J.M., Pourkashanian, M., Williams, A., 2007, "Modelling the combustion of pulverized biomass in an industrial combustion test furnace", *Fuel*, **86**, 1959-1965.



- 15- Yin, L., Rosendahl, S., Kær, K., 2012, "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**, 65–73.
- 16- Gubba, S. R., Ma, L., Pourkashanian, M., Williams, A., 2011, "Influence of particle shape and internal thermal gradients of biomass particles on pulverized coal/biomass co-fired flames", *Fuel Processing Technology*, **92**, 2185–2195.
- 17- Bonefacic, B., Frankovic, A., Kazagic, 2015, "Cylindrical particle modeling in pulverized coal and biomass co-firing process", *Applied Thermal Engineering*, **78**, 74-81.
- 18- Hou, Sh. Sh., Chen, M.C., Lin, T.H., 2014, "Experimental study of the combustion characteristics of densified refuse derived fuel (RDF-5) produced from oil sludge", *Fuel*, **116**, 201–207.
- 19- Zhou, L., Jian, X., Liu, J., 2009, "Characteristics of oily sludge combustion in circulating fluidized beds", *Journal of Hazardous Materials*, **170**, 175–179.
- 20- Liu, J., Jiang, X., Zhou, L., Wang, H., Han, X., 2009, "Co-firing of oil sludge with coal–water slurry in an industrial internal circulating fluidized bed boiler", *Journal of Hazardous Materials*, **167**, 817–823.
- 21- Ettouati, H., Boutoub, A., Benticha, H., 2007, "Radiative Heat Transfer in Pulverized Coal Combustion: Effects of Gas and Particles Distributions", *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, **31**, 345-353.
- 22- Tabet, F., Gökalp, I., 2015, "Review on CFD based models for co-firing coal and biomass", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **51**, 1101–1114.
- 23- ANSYS FLUENT Theory Guide, 2011, Version 14, Ansys Inc., USA.
- 24- Miller B., Tillman, D., 2008, "Combustion engineering issues for solid fuel", Elsevier Inc.
- 25- Agraniotis, M., 2010, Coal substitution of alternative and support in fuel boilers for pulverized fuel CO<sub>2</sub> emission reduction, Ph.D. Thesis, National Technical University of Athens.
- ۲۶- سولماز فرح وشی، ۱۳۹۶، شبیه سازی عددی احتراق سوخت جامد مشتق شده از لجن نفتی، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد.
- 27- Shirneshan, A.R., Jamalvand, H., 2016, "Numerical investigation of combustion of biomass, methane, and gasoil fuels and emissions from a furnace chamber" *Energy and Policy Research*, **3**, 1, 19-26.
- 28- Liakos, H. H., Thoelogos, K. N., Boundovis, A. G., Markatos, N. C., 1998, "Pulverized coal char combustion: the effect of particle size on burner performance", *Applied Thermal Engineering*, **18**, 981-989.
- 29- Holtmeyer, M. L., Kumfer, B. M., Axelbaum, R. L., 2012, "Effects of biomass particle size during cofiring under air-fired and oxyfuel conditions", *Applied Energy*, **93**, 606–613.