

تحلیل پاشش سوخت مایع و مشخصه‌های جریان احتراقی درون

یک محفظه احتراق

محمد صادق عابدی نژاد*

۱- استادیار، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۴)

چکیده

هدف از مقاله حاضر تحلیل مشخصه‌های احتراقی در جریان واکنشی درون محفظه احتراق مدل توربین گاز هوایی در شرایط مختلف پاشش سوخت مایع می‌باشد. جهت مدل‌سازی جریان دو فاز قطرات سوخت و گاز، از نگرش اویلر-لاگرانژ و اتصال دو طرفه بین فاز گاز و قطرات استفاده شده است. برای حل معادلات حاکم از شبکه‌بندی سازمان‌یافته حجم محدود استفاده شده است. رهیافت متوسط‌گیری رینولدز ناوبر استوکس (RANS) و مدل جهات مجزاء برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان و انتقال حرارت تشعشعی استفاده شده است. از مدل واکنش فلیملت پایا برای مدل‌سازی احتراق و تابع چگالی احتمالی جهت مدل‌سازی برهم‌کنش بین جریان آشفته و واکنشی استفاده شده است. همچنین یک مکانیزم شیمیایی با ۲۶ واکنش و ۱۷ گونه برای مدل‌سازی احتراق سوخت Jet-A استفاده شده است. مدل‌سازی NOx به صورت پس‌پردازش توسط مدل نرخ محدود انجام شده است. نتایج حاکی از این است که افزایش سرعت پاشش سوخت موجب ترویج احتراق در ناحیه اولیه و دمای شعله بالاتر می‌شود و نهایتاً موجب افزایش مقدار آلاینده NO می‌شود. هرچقدر زاویه پاشش کوچکتر باشد قطره‌های حاصل از پاشش در ناحیه کوچکتري متمرکز می‌شوند و موجب کاهش آلاینده NO می‌شود.

واژه‌های کلیدی: محفظه احتراق، فلیملت، توزیع آلاینده، جریان پاششی، شرایط پاشش سوخت

Analysis of Liquid Fuel Spray and Combustive Flow Characteristics inside a Combustion Chamber

Abstract

The purpose of this paper is to analyze the combustion characteristics in the reactive flow inside an aero gas turbine model combustion chamber under different conditions of liquid fuel spray. In order to model the two-phase flow of fuel and gas droplets, the Euler-Lagrange approach and two-way connection between the gas phase and the droplets have been used. To solve the governing equations, the finite volume structured mesh has been used. The Reynolds Navier Stokes (RANS) averaging approach and discrete ordinate model have been used to simulate flow turbulence and radiative heat transfer. The steady flamelet reaction model and the probability density function have been employed to model the combustion and interaction between turbulent and reactive flow, respectively. Also, a chemical mechanism with 26 reactions and 17 species has been used to model the combustion of Jet-A fuel. NOx modeling has been done as a post-processing by the finite rate model. The results indicate that increasing the fuel spray velocity promotes combustion in the initial region and higher flame temperature, and finally increases the amount of NO pollutant. The smaller spray cone angle causes the droplets resulting from the spray will be concentrated in a smaller area and will reduce the NO pollutant.

Key words: Combustion Chamber, Flamelet, NOx Emission, Spray Flow, Fuel Spray Condition

* نویسنده پاسخگو، تلفن: ۰۲۱۸۵۶۹۳۰۲۴ پست الکترونیک: m.abedinejad@alzahra.ac.ir

این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس از آدرس <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



مقدمه

در موتورهای هوایی از سوخت‌های مایع (نظیر JP-4 و Jet-A) استفاده می‌شود. بنابراین، قبل از رخداد پدیده احتراق، سوخت مایع به وسیله اتمایزر به قطرات ریز تبدیل شده و سپس تبخیر می‌گردند. پیچیدگی جریان‌های چند فاز حاصل از پاشش سوخت مایع از این جهت هست که پدیده‌های بسیاری نظیر برهم‌کنش بین قطرات مستقل با جریان گاز، آشفتنگی، انتقال جرم بین فاز حاوی قطره و فاز گاز، انتقال گرما بین فازها و برهم‌کنش بین خود قطرات در این فرآیند حاضر هستند. این حالت زمانی پیچیده‌تر می‌شود که قطرات بخوانند تغییر فاز بدهند و وارد محیط احتراقی گردند. آنها گرم شده و شعله‌ور می‌گردند و گازهای گرم حاصل از احتراق در محیط گاز آزاد می‌شوند. نرخ تبخیر قطره به توزیع خاص قطرات و شرایط سوخت و هوای ورودی به محفظه احتراق که پارامترهای کلیدی برای آماده‌سازی اختلاط سوخت و هوای همگن هستند، بستگی دارد. اگر نسبت اختلاط سوخت و هوا مناسب نباشد، سوخت به صورت کامل نمی‌سوزد و بر روی بازدهی احتراق، توزیع دما، دمای شعله و تولید آلاینده NO_x تأثیر مستقیم دارد. به دلیل طبیعت پیچیده پاشش، پودرسازی، تبخیر و فرآیند احتراق سوخت، تلاش‌ها و آزمون و خطاهای ارزشمند بسیاری انجام گردیده و در دهه اخیر توجه چشم‌گیری به این موضوع شده است.

تحقیقات پاشش سوخت در هر دو حالت جریان سرد (بدون احتراق) و جریان گرم (همراه با احتراق) انجام شده است. معمولاً هدف از انجام تحقیقات بدون احتراق، ارزیابی قطر قطرات سوخت و عوامل موثر بر توزیع قطرات بوده است.

دورینا و همکاران (۲۰۱۴) [۱] یک مطالعه تجربی از قطر قطرات، سرعت محوری قطرات و اثر افزایش فشار تزریق در انژکتورهای چرخشی فشار انجام داده‌اند. آنها بدین نتیجه رسیدند که زاویه مخروط اسپری، به شدت به فشار تزریق سوخت وابسته است. برای مقادیر کمتر از ۳۰۰ کیلو پاسکال، یک پاشش تمام مخروطی با جرم مایع در مرکز تولید می‌گردد و با افزایش فشار به یک پاشش مخروطی توخالی تبدیل می‌شود. قطر میانگین ساتر قطرات (SMD) با افزایش فشار تزریق کاهش می‌یابد و در نهایت با افزایش فشار تزریق، مقدار سرعت محوری قطرات افزایش می‌یابد.

برونبارز و همکاران (۲۰۱۶) [۲] به طور تجربی عواملی مانند توزیع قطر قطرات، اثر هندسه روزنه و اثر افزایش فشار پاشش در انژکتورهای فشار چرخشی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج به دست آمده نشان داد که اندازه قطرات با افزایش فشار تزریق کاهش می‌یابد و توزیع اندازه قطرات گسترش می‌یابد. کوچکترین قطر قطرات با پودرسازی در اتمایزرهای دهانه پروفیلی و مخروطی شکل به دست آمد، با این حال بزرگترین قطر قطرات برای اتمایزرهای روزنه ساده به دست آمد.

لیو و همکاران (۲۰۱۹) [۳] به طور تجربی عواملی مانند الگوی تزریق، توزیع قطر قطرات و تأثیر فشار پاشش بر تزریق نفت سفید در انژکتورهای فشار چرخشی را بررسی کرده‌اند. آنها بدین نتیجه رسیدند که در صورت اختلاف فشار بیشتر از ۲۵ بار، پودر سازی اولیه، پودر سازی ثانویه و برخورد قطرات در فرآیند پودرسازی وجود دارد و غلبه برخورد قطرات بر پودر سازی ثانویه در پایین دست پاشش منجر به افزایش اندازه قطرات می‌شود.

دفسری و همکاران (۲۰۱۹) [۴] نشان دادند که کاهش دمای سوخت، کیفیت پودرسازی در یک محفظه احتراق توربین گاز را کاهش می‌دهد. هم چنین سبب کاهش زاویه پاشش و مولفه‌های سرعت می‌گردد و تعداد کمتری قطرات ریز تولید می‌شود.

در مطالعات همراه با احتراق، تمرکز تحقیقات بیشتر در حوزه توزیع دما، بازده احتراق و تعداد اندکی توزیع آلاینده‌ها بوده است. داتا و سام (۱۹۹۹) [۵] به بررسی عددی تأثیر قطر قطرات پاشش سوخت ورودی بر بازده احتراق و دمای خروجی یک محفظه احتراق پرداخته‌اند. آنها بدین نتیجه رسیدند که با افزایش قطر متوسط قطرات، فاکتور الگوی دمای قطرات بهبود می‌یابد. با این حال، بیشترین بازده احتراق در یک قطر بهینه حاصل می‌شود.

کانائیان و صدر (۲۰۱۴) [۶] در یک تحقیق تجربی و با به‌کارگیری دو نوع سوخت مختلف نشان دادند که تأثیر خواص فیزیکی سوخت بر ویژگی‌های اسپری عمدتاً در مناطق نزدیک به خروجی نازل در فشار تزریق بالاتر مشهود است. به نظر می‌رسد که لزجت و کشش سطحی کمتر سوخت GTL در مقایسه با سوخت Jet A-1 در شرایط جوی منجر به تجزیه و پراکندگی سریعتر قطرات می‌شود. اگر چه ویژگی‌های کلی

پیش‌فیلم بر مشخصه‌های احتراقی درون یک محفظه احتراق توربین گاز واقعی بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که وقتی اختلاف فشار سوخت کم باشد، میانگین قطر ساتر (SMD) اتمایزر هوادم پیش‌فیلم‌کننده کوچک‌تر از اتمایزر هوادم بدون پیش‌فیلم بود. همانطور که اختلاف فشار سوخت به طور مداوم افزایش می‌یافت، SMD اتمایزر هوادم پیش‌فیلم به تدریج بزرگتر از اتمایزر هوادم بدون پیش‌فیلم می‌شود. هنگامی که جریان هوای ورودی کوچک است، احتراق طرح غیرپیش‌فیلم بهتر از طرح پیش‌فیلم است. با افزایش مداوم جریان هوای ورودی، عملکرد احتراق طرح پیش‌فیلم بهتر از طرح غیرپیش‌فیلم شده و راندمان احتراق بالاتری در شرایط ایده‌آل زمین برای نسبت‌های مختلف سوخت به هوا داشته است. کیفیت توزیع دما در خروجی مربوط به طرح بدون پیش‌فیلم بهتر از طرح پیش‌فیلم نیز بوده است.

مطابق مطالعات انجام شده، تا به حال تحقیقات اندکی در خصوص تاثیر شرایط مختلف پاشش سوخت انجام شده که اغلب جهت بررسی جریان در اتمایزر و عدم وجود پدیده احتراق بوده است. در محدود تحقیقاتی که نیز در این زمینه انجام شده است برهم‌کنش شرایط پاشش (قطر قطرات)، پدیده احتراق و آلاینده‌ها بر یکدیگر مورد کاوش قرار نگرفته است و به صورت همزمان پاشش (توزیع قطر قطرات) و آلاینده مورد تحلیل قرار نگرفته است. در مقاله‌ی حاضر به بررسی اثر شرایط مختلف سوخت بر قطر قطرات سوخت و غلظت گونه‌های احتراقی اعم از CO_2 ، H_2O ، O_2 و NO پرداخته شده است. یک مکانیزم تقلیل یافته با ۲۸ واکنش و ۱۷ گونه برای مدل‌سازی فرایند شیمیایی احتراق سوخت Jet-A در نظر گرفته شده است. تمایز این تحقیق با پژوهش‌های قبلی در بررسی پنج وضعیت مختلف پاشش سوخت در یک هندسه محفظه احتراق توربین گاز مدل است که همه اجزای محفظه‌های احتراق اعم از چرخاننده، سوخت‌پاش هوادم (ایربلست)، سوراخ‌های اولیه و ثانویه را شامل می‌شود. در حالت اول شرایط مرزی منطبق بر شرایط آزمایشگاهی [۱۳] بوده و پس از اعتبار سنجی نتایج حل عددی با داده‌های تجربی، حالت‌های بعدی بررسی شده‌اند. در شبیه‌سازی عددی جریان دوفاز واکنشی این محفظه احتراق، از مدل آشفتگی $k - \epsilon$ Realizable مدل احتراقی فیلیمت پایا^۴ و مدل تشعشعی جهات مجزا^۵ استفاده می‌شود. پاشش قطرات سوخت مایع و محیط دوفازی قطره و هوا توسط روش

سوخت‌ها مشابه است، اما اثرات خواص سوخت بر روی ویژگی‌های اسپری محلی در فشار تزریق بالاتر مشهود است.

چن^۷ و همکاران (۲۰۱۹) [۷] تاثیر تغییر نوع سوخت (سوخت جت RP-3، ان‌دکان و ایزواکتان) و دمای هوای ورودی (383 K به 483 K) را بر پایداری احتراق در یک محفظه احتراق توربین گاز به روش تجربی مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش دما از 403 K به 423 K از پایداری احتراق کاسته می‌شود. هم‌چنین در دماهای پایین هوای ورودی، در احتراق با سوخت‌های ان‌دکان و RP-3 پایداری بیشتری مشاهده گردیده است.

شین^۸ و همکاران (۲۰۲۰) [۸] تاثیر خواص فیزیکی سوخت بر مشخصه‌های پاشش از یک نازل توربین گاز بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که چگالی، ویسکوزیته و کشش سطحی بالاتر، فرآیند اتمی‌زاسیون را به تاخیر می‌اندازد و چگالی و کشش سطحی نسبت به ویسکوزیته در رژیم شکست قطرات تأثیر قابل توجهی بر اتمی‌ز شدن اسپری دارند

کنکاشور^۹ و همکاران (۲۰۲۱) [۹] در یک تحقیق تجربی به بررسی تاثیر زاویه پاشش سوخت از یک اتمایزر فشاری چرخشی در نرخ دبی‌های مختلف هوای ورودی بر توزیع دما و شعله در یک میکرو محفظه احتراق استوانه‌ای پرداخته و دریافته‌اند که افزایش زاویه پاشش سوخت، سبب تثبیت بهتر شعله می‌گردد.

سادات اخوی و همکاران (۲۰۲۱) [۱۰] تاثیر فشار پاشش و نسبت هم‌ارزی بر احتراق درون یک محفظه احتراق استوانه‌ای را بررسی نموده‌اند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش نسبت هم‌ارزی کلی، دمای محفظه افزایش می‌یابد. با افزایش فشار پاشش در یک نسبت هم‌ارزی ثابت، شعله به سمت احتراق پایین دست کشیده می‌شود. احتراق ناقص کاهش می‌یابد و فاکتور الگو^{۱۰} بازده احتراق بهبود می‌یابد.

ابراهیم و همکاران (۲۰۲۲) [۱۱] تاثیر نسبت جرم هوا به سوخت ورودی (ALR) را بر مشخصه‌های جریان سوخت کروسین در یک محفظه احتراق توربین گاز بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش ALR، میانگین قطر ساتر پاشش کاهش می‌یابد، اما اثر کاهش قطر قطرات در ALR پایین‌تر نسبت به نمونه‌های بالاتر، تندتر بوده است.

و نگ^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۳) [۱۲] طی یک تحقیق تجربی تاثیر به کارگیری اتمایزرهای هوادم^{۱۲} پیش‌فیلم^{۱۳} و غیر

عبارت سمت چپ، اینرسی یک قطره است که شرح‌دهنده مقاومت جرم برای تغییر سرعت و جهت آن است. عبارت سمت راست شرح‌دهنده نیروی پسی اصطکاکی است که به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۸]:

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \frac{Re}{24} \quad (۳)$$

در اینجا، \vec{u} سرعت فاز پیوسته، \vec{u}_p سرعت قطره، μ گرانروی مولکولی سیال، ρ چگالی سیال، ρ_p چگالی قطره و d_p قطر قطره است. Re عدد رینولدز نسبی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \quad (۴)$$

ضریب پسا C_D برای مدل کردن وابستگی پیچیده بین قطره و شرایط سیال به کار می‌رود. ضریب پسا ثابت نیست و به گرانروی فاز پیوسته، سرعت نسبی و شکل قطره وابسته است. در این پژوهش، ضریب پسا برای قطره کروی استفاده می‌شود و از طریق روابط (۵) محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{1}{6} Re^{2/3} \right) \quad Re \leq 1000 \quad (\text{الف-۵})$$

$$C_D = 0.44 \quad Re \geq 1000 \quad (\text{ب-۵})$$

مدل دمای یکنواخت (تعادلی) برای مدل کردن دمای قطره استفاده شده است. همچنین فرض شده که تغییر دما درون قطره وجود ندارد و دمای داخل قطره همگن است. بنابراین، قطرات گسسته‌سازی نمی‌شوند و هزینه محاسبات کاهش می‌یابد [۱۹، ۲۰].

نرخ تبخیر $\frac{dm_p}{dt}$ از طریق رابطه انتقال جرم اطراف قطره محاسبه می‌شود.

$$\frac{dm_d}{dt} = \pi d_d \rho_\infty D_{im} Sh_{AB} \ln(1 + B_m) \quad (۶)$$

که d_d قطر قطره، ρ_∞ چگالی فاز گازی و D_{im} ثابت نفوذ بخار در فاز گاز است. Sh_{AB} و B_m به ترتیب عدد شرودو و عدد جرم اسپالدینگ هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Sh_{AB} = 2 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3} \quad (۷)$$

$$B_m = \frac{Y_{i,s} - Y_{i,\infty}}{1 - Y_{i,s}} \quad (۸)$$

که $Y_{i,s}$ و $Y_{i,\infty}$ دلالت بر کسر جرمی بخار روی صفحه و کسر جرمی بخار موجود در فاز گازی دارند و Sc عدد اشمیت

اویلر-لاگرانژی مدل‌سازی می‌شوند. حاصل تحقیق حاضر، مقایسه توزیع سرعت، دما، قطر متوسط قطرات و غلظت محصولات احتراقی روی محور طولی و صفحه خروجی محفظه است.

معادلات حاکم

فاز پیوسته

معادلات حاکم بر جریان واکنشی آشفته شامل معادله بقای جرم، بقای تکانه، بقای انرژی و بقای اجزای واکنشی می‌باشد. شکل کلی معادلات مزبور در مختصات استوانه‌ای و در شرایط پایا و جریان غیرقابل تراکم، به صورت معادله (۱) می‌باشد [۱۴].

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial X}(\rho U \Psi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho V \Psi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho W \Psi) \\ = \frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma_\Psi \frac{\partial \Psi}{\partial X} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_\Psi \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\Gamma_\Psi \frac{\partial \Psi}{r \partial \theta} \right) + S_{\Psi 1} + S_{\Psi 2} \end{aligned} \quad (۱)$$

که Ψ بیانگر متغیرهای وابسته شامل جرم، ممنتوم، انرژی جنبشی آشفته‌گی، نرخ اضمحلال انرژی آشفته‌گی، آنتالپی و کسر جرمی گونه‌ها می‌باشد. با قرار دادن عدد یک به جای Ψ ، معادله بقای جرم حاصل می‌گردد. معادلات بقای ممنتوم از جایگذاری عبارات U ، V و W درون Ψ بدست می‌آیند. در صورتی که به جای Ψ از عبارات h و Y_i استفاده گردد، معادلات انرژی و کسر جرمی گونه‌ها بدست می‌آیند. دو پارامتر $S_{\Psi 1}$ و $S_{\Psi 2}$ به ترتیب عبارات چشمه و چاه برای فاز گازی و فاز قطرات می‌باشند.

فاز گسسته

جریان گاز به عنوان فاز پیوسته است و به صورت اویلری مدل می‌شود. اما در ناحیه نزدیک به سوخت‌پاش، به دلیل پاشش قطرات که در محدوده میکرومترند و کسر حجمی آن‌ها کمتر از ۱۰ درصد کسر حجمی فاز گازی می‌شود، فاز گسسته‌ای ایجاد می‌شود که برای مدل کردن آن از مدل لاگرانژی استفاده می‌شود [۱۵-۱۷]. معادله حرکت قطرات در فضای لاگرانژی، مبتنی بر قانون دوم نیوتن است که مجموع نیروهای وارد بر جرم باعث شتاب آن می‌شود. مسیر حرکت قطرات از معادله حرکت به دست می‌آید.

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (۲)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G + B - \rho \varepsilon \quad (۱۳)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \right. \right. \quad (۱۴)$$

$$\left. \left. \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{\rho}}} \quad (\text{الف})$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]; \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (۱۴) \quad (\text{ب})$$

$$S = \sqrt{2S_{i,j}S_{i,j}}; \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۱۴) \quad (\text{ج})$$

$$C_2 = 1.9; \quad \sigma_k = 1.0; \quad \sigma_\varepsilon = 1.2 \quad (۱۴) \quad (\text{د})$$

پارامتر η بیان‌کننده نسبت زمان مشخصه آشفتگی به زمان مشخصه میدان جریان، k انرژی جنبشی و ε نرخ اضمحلال است.

احتراق

از مهم‌ترین عوامل موثر در شبیه‌سازی دقیق جریان‌های واکنشی، مدل احتراق است. در مدل احتراقی فلیمیت، شعله نفوذی مغشوش به صورت یک مجموع آماری از شعله‌های کوچک (فلیمیت‌های) آرام در نظر گرفته می‌شود [۲۵، ۲۶]. از آنجایی که معمولاً مقیاس زمانی واکنش کوچک است (اختلاط کنترل‌کننده پدیده‌های شعله است)، شیمی احتراق در لایه نازکی که لایه مصرف سوخت و لایه داخلی نامیده می‌شود، بسیار فعال است. اگر این لایه در مقایسه با کوچکترین مقیاس جریان، یعنی مقیاس گردابه کولموگروف نازک باشد، می‌توان فرض نمود که احتراق در بین یک جریان شبه آرام احاطه شده و فرض فلیمیت آرام صادق است. ولی اگر اغتشاش آن قدر شدید باشد که گردابه کولموگروف کوچکتر از لایه داخلی شده و در آن نفوذ کند، می‌تواند ساختار آن لایه را بر هم زده و احتمال خاموشی وجود دارد. بنابراین با فرضیات ارائه شده برای فلیمیت، واکنش‌های شیمیایی و فرآیندهای اختلاط مغشوش را می‌توان به طور جداگانه در نظر گرفت، به طوری که ساختار ناحیه واکنش آرام باقی می‌ماند. معادله کسر جرمی و معادله دمای اجزاء (حاصل شده از معادله انرژی) در دستگاه کسر مخلوط، به صورت زیر می‌باشند:

است. دمای قطره براساس معادله تعادل حرارتی قطره به‌روزرسانی می‌شود.

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) - \frac{dm_p}{dt} h_{fg} \quad (۹)$$

که $\frac{dm_p}{dt}$ ، T_p ، h ، C_p و h_{fg} به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه قطره در فشار ثابت، دمای قطره، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، دمای فاز پیوسته، نرخ تبخیر و حرارت تغییر فازند. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با استفاده از رابطه عدد ناسلت به دست می‌آید:

$$Nu = \frac{h d_p}{k_\infty} = \frac{\ln(1 + B_T)}{B_T} \left(2 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr^{1/3} \right) \quad (۱۰)$$

که k_∞ ضریب انتقال حرارت هدایت فاز پیوسته، Pr عدد پرانتل فاز پیوسته و B_T عدد انتقال حرارت اسپالدینگ است. اثر جریان آشفته بر روی توزیع قطرات در فاز پیوسته به وسیله مدل حرکت تصادفی، که شامل سرعت آنی آشفته مسیر قطره است، انجام می‌شود. مقدار سرعت آنی جریان گاز به صورت زیر است:

$$u = \bar{u} + u' \quad (۱۱)$$

که \bar{u} سرعت میانگین فاز پیوسته و u' سرعتی است که به واسطه حضور گردابه‌ها ایجاد می‌شود و از توزیع احتمالی گوسی به دست می‌آید:

$$u' = \xi \sqrt{u'^2} = \xi \sqrt{\frac{2k}{3}} \quad (۱۲)$$

که توزیع نرمال عدد تصادفی و مقدار محلی RMS از مولفه‌های نوسانات سرعت از انرژی جنبشی آشفته تحت فرض ایزوتروپیک بودن جریان آشفته حاصل می‌شود.

مدل‌های عددی آشفتگی

بنابر تحقیقات گذشته [14, 21-23] در پژوهش حاضر از مدل $k - \varepsilon$ Realizable برای مدل‌سازی آشفتگی جریان در محفظه احتراق مدل توربین گاز استفاده می‌شود. معادلات انتقال در مدل $k - \varepsilon$ Realizable به وسیله شیخ و همکاران [۲۴] ارائه شده است که به صورت زیر است:

در کار حاضر، دو نوع NOx حرارتی و ناگهانی مورد محاسبه قرار گرفته‌اند. برای محاسبه NOx حرارتی از مکانیزم توسعه یافته زلدوویچ^{۲۰} و برای محاسبه رادیکال‌های O و OH، از فرض تعادل جزئی استفاده شده است [۱۹]. نرخ تشکیل NOx ناگهانی، از رابطه ارائه شده توسط دیسویت^{۲۱} محاسبه می‌گردد.

انتقال حرارت تشعشع

معادله انتقال حرارت تشعشعی در محیط‌های گازی یک معادله انتگرال-دیفرانسیلی است و حل آن بسیار مشکل است. لذا، جهت حل معادله بالا، استفاده از روش‌های عددی و مدل سازی انتقال حرارت تشعشع مقبولیت خاصی پیدا کرده است. در محفظه‌های احتراقی که شامل سطوح و گازهای مختلف نشده‌اند و جذب‌کننده شارهای حرارتی تابشی‌اند، نیاز به مدلی است که انتقال حرارت تشعشعی را با دقت کافی و هزینه محاسباتی مناسب تقریب زند. بعضی از مدل‌های انتقال حرارت تشعشعی عبارت‌اند از: مدل انتقال تابش مجزا^{۲۲} مدل P-1، مدل رزلند^{۲۳} و مدل جهات مجزا. در این تحقیق، به دلیل دقت و هزینه محاسباتی معقول از مدل جهات مجزا استفاده شده است [۲۸-۳۱]. همچنین، با توجه به تغییرات دایمی دما، فشار، غلظت گونه‌ها در احتراق و گازهای حاصل از آن، ثابت‌گرفتن ضریب جذب باعث کاهش دقت محاسبات می‌شود. لذا، در این تحقیق از مدل توزیع وزنی مجموع گازهای خاکستری، که توسط اسمیت و همکاران [۳۲] پیشنهاد شده، برای به‌دست آوردن ضریب جذب گازهای حاصل از احتراق استفاده شده است.

فاز گسسته

سوخت در دمای ۳۰۰ کلوین با سرعت نسبی ۱۱۰ متر بر ثانیه و زاویه مخروطی ۳۰ درجه از یک سوخت‌پاش هوادم به درون محفظه پاشیده می‌شود. با توجه به این که کسر حجمی قطرات کوچکتر از ۰.۰۰۱ است، لذا نیازی به محاسبه برخورد قطرات با یکدیگر نمی‌باشد و به عبارت دیگر یک قطره از دیگر قطرات تأثیر نمی‌پذیرد. در عین حال وجود فاز گسسته بر روی فاز اصلی تأثیرگذار است و بایستی این تأثیرگذاری در معادلات فاز پیوسته به صورت یک ترم چشمه لحاظ شوند. اطلاعات بیشتر در خصوص نحوه مدل‌سازی فاز گسسته و معادلات حاکم بر آن در مرجع [۲۳] ذکر شده است.

حلگر محاسباتی

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho \chi \frac{\partial^2 Y_i}{\partial f^2} + S_i \quad (15)$$

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho \chi \frac{\partial^2 T}{\partial f^2} - \frac{1}{c_p} \sum_i H_i S_i + \frac{1}{2c_p} \rho \chi \left[\frac{\partial c_p}{\partial f} + \sum_i c_{p,i} \frac{\partial Y_i}{\partial f} \right] \frac{\partial T}{\partial f} \quad (16)$$

در معادلات فوق Y_i نسبت جرمی گونه نام، $c_{p,i}$ گرمای ویژه گونه نام و c_p گرمای ویژه میانگین ترکیب می‌باشد. S_i نیز نرخ واکنش، H_i آنتالپی ویژه گونه نام و پارامتر χ نرخ استهلاك اسکالر می‌باشند. دما و کسر جرمی گونه‌ها در حالت پایا، تابعی از کسر مخلوط و کمیت غیر تعادلی نرخ استهلاك اسکالر بوده که بیانگر اثر میدان جریان روی ساختار فیلیمت می‌باشند. توزیع گونه‌ها و دما به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$Y_i = Y_i(f, \chi) \quad (17-الف)$$

$$T = T(f, \chi) \quad (17-ب)$$

کمیت‌های ترموشیمیایی تولیدی از فیلیمت تشکیل یک بانک اطلاعاتی می‌دهند. این کمیت‌ها تابعی غیر خطی از کسر مخلوط هستند و برای بدست آوردن مقدار متوسط این کمیت‌ها، تنها دانستن کسر مخلوط متوسط کافی نبوده و باید نوسانات آن را نیز در نظر گرفت. تأثیر نوسانات آشفستگی بر روی این کمیت‌ها با استفاده از تابع چگالی احتمال فرضی بتا $p(f, \chi_{st})$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. نرخ استهلاك اسکالر از معادلات جریان بر اساس معیار زیر محاسبه می‌شود:

$$\tilde{\chi} = c_\chi \frac{\varepsilon}{k} f'^2 \quad (18)$$

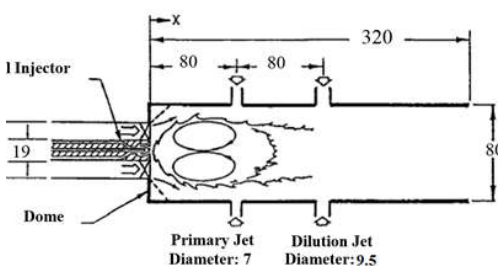
در این روابط k ، انرژی جنبشی اغتشاش و ε استهلاك اغتشاش می‌باشند و ضریب c_χ معمولاً برابر با ۲ در نظر گرفته می‌شود. در مقاله حاضر، تعداد ۱۳ فیلیمت آرام در بسته نرم افزاری انسیس فلونت ایجاد شده است که در نهایت خاموشی شعله، در نرخ استهلاك بین ۱۲ و ۱۳ رخ می‌دهد. تولید بانک اطلاعاتی فیلیمت پایا، بر اساس مکانیزم کاهش یافته و ۲۶ مرحله‌ای سوخت Jet-A انجام شده است [۲۷].

خارجی چرخاننده هستند.

سالیدیتی بیانگر نسبت طول وتر چرخاننده به گام آن است. برای چرخاننده محوری، سالیدیتی به عنوان تابعی از زاویه پره به معادله زیر تعریف می شود.

$$\sigma = \frac{c \sin \theta}{s} \quad (20)$$

که σ سالیدیتی پره، c وتر و s فاصله بین پره‌های مجاور است. نازل پاشش سوخت این محفظه نیز از نوع هوادم است. هوای ورودی به محفظه احتراق ۱۶۳ کیلوگرم بر ساعت بوده که در دمای ۳۷۳ کلوین و فشار ۱ اتمسفر، ۲۵ درصد آن به چرخاننده و از باقی‌مانده آن، ۳۵ درصد سهم فواره‌های اولیه و ۴۰ درصد مابقی صرف رقیق‌سازی جریان درون محفظه می شود. سوخت Jet-A به میزان ۲/۲۷ کیلوگرم بر ساعت در دمای ۳۰۰ کلوین از نازل سوخت هوادم وارد محفظه می‌شود.



شکل ۱- نمای شماتیک از محفظه احتراق مدل (ابعاد میلیمتر)

شرایط مرزی در ورودی و خروجی دامنه محاسباتی به ترتیب جریان جرمی ورودی و فشار خروجی لحاظ شده‌اند. در مسئله حاضر شرایط مرزی گرمایی و سرعت دیوار به ترتیب آدیاباتیک و عدم لغزش فرض شده‌اند.

از شبکه سازمان یافته بوده جهت گسسته سازی هندسه استفاده شده است. با توجه به این که در نواحی اولیه محفظه احتراق، پدیده احتراق رخ می‌دهد و فواره‌های اولیه و رقیق‌سازی نیز تاثیر زیادی بر جریان می‌گذارند، در این نواحی از سلول‌های ریزتری برای شبکه‌بندی استفاده شده است. جهت رسیدن به نتایج پایدار و مستقل از شبکه، از چهار سایز شبکه مختلف برای شبیه‌سازی جریان درون محفظه استفاده شده است که شبکه‌های "الف"، "ب"، "ج" و "د" به ترتیب دارای دو، سه و پنج هزار، پانصد هزار، هشتصد و هفتاد هزار و یک میلیون و سیصد هزار سلول محاسباتی هستند. شکل ۲ توزیع سرعت محوری را در این چهار شبکه نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۲،

معادلات حاکم بر جریان به صورت ضمنی خطی سازی و به صورت مرتبه دو گسسته‌سازی شده‌اند. عبارت‌های دیفیوژن در معادلات انتقال، با استفاده از روش اختلاف مرکزی و عبارات جابجایی به صورت مرتبه دو بالادست گسسته شده‌اند. الگوریتم سیمپل C عبارات فشار و سرعت را به یکدیگر متصل می‌کند. شبیه‌سازی جریان با معیار همگرایی 10^{-5} برای معادله بقای پیوستگی، 10^{-6} برای معادلات انرژی، ممنتوم، احتراق، فاز گسسته و تشعشع گرمایی انجام شده است.

معرفی هندسه و شرایط مرزی

در مقاله حاضر، از هندسه محفظه احتراق استوانه‌ای مدل کامرون^۷ و همکاران [۱۳] جهت بررسی مشخصه‌های جریان و انتقال حرارت استفاده شده است. شکل ۱ طرح‌واره‌ای از این هندسه را نشان می‌دهد. محفظه احتراق WJCC^۸ که حاصل تحقیقات ۱۲ ساله ساموئلسن^۹ و همکاران [۱۳] است، از یک شش ضلعی به طول ۳۲۰ میلی‌متر و قطر ۸۰ میلی‌متر تشکیل شده است. چهار فواره اولیه عمود بر هم به قطر ۷/۵ میلی‌متر در فاصله ۸۰ میلیمتری از صفحه ورودی محفظه احتراق، جهت بهبود احتراق و کمک به تشکیل ناحیه بازگردش تعبیه شده است. یک ردیف چهارتایی سوراخ دیگر نیز به قطر ۹ میلیمتر در فاصله ۱۶۰ میلیمتری از ورودی محفظه احتراق قرار داده شده است تا ضمن رقیق‌سازی گازهای حاصل از احتراق، دمای خروجی از محفظه احتراق را یکنواخت‌تر سازد. یکی از اجزای مهم در محفظه احتراق، چرخاننده است که جهت پراکندگی بیشتر جریان و پایدارتر کردن شعله در محفظه احتراق به کار می‌رود. چرخاننده مورد استفاده در محفظه WJCC از نوع محوری بوده که قطر داخلی آن ۱۹ میلی‌متر و قطر خارجی آن ۵۷ میلی‌متر است. عدد چرخش و سالیدیتی^۲ پره‌ها خازنده اصلی به ترتیب ۱/۴ و ۱۰۰ درصد بوده و ۱۲ پره آن زاویه ۶۰ درجه با یکدیگر دارند.

عدد چرخش نسبت شار محوری تکانه زاویه‌ای به شار محوری تکانه محوری است و در یک چرخاننده محوری با یک زاویه پره ثابت توسط معادله زیر محاسبه می‌گردد.

$$S_n = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - \left(\frac{D_{hub}}{D_{tip}} \right)^2}{1 - \left(\frac{D_{hub}}{D_{tip}} \right)^3} \right] \tan \theta \quad (19)$$

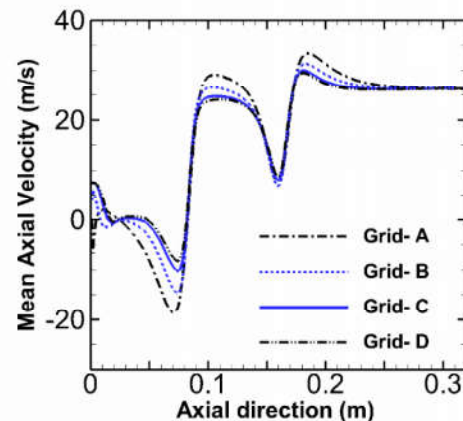
که S_n عدد چرخش، θ زاویه پره، D_{hub} قطر داخلی و D_{tip} قطر

سه مقطع مختلف و غلظت گونه‌های CO_2 و NO در مقطع خروجی مورد مقایسه قرار می‌گیرند. جهت اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی و مقایسه آن‌ها با داده‌های تجربی، از پارامتر انحراف متوسط $(MD)^2$ استفاده شده است.

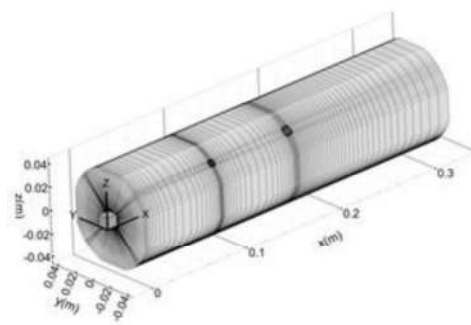
$$MD = \frac{|Experimental\ data - Numerical\ results|}{Experimental\ data} \times 100 \quad (21)$$

در شکل ۴ توزیع سرعت محوری در سه مقطع طولی مختلف از محفظه احتراق مدل ترسیم شده است. قبل از تحلیل نتایج، اهمیت هر یک از این مقاطع بیان می‌گردد. مقطع $X = 0.04\ m$ در ناحیه پایین‌دست سوخت‌پاش، پیش از فواره‌های اولیه قرار دارد که اهمیت آن به دلیل برخورد جریان حاصل از سوخت‌پاش و چرخاننده می‌باشد. مقطع $X = 0.1\ m$ نیز برای استخراج سرعت نواحی بین فواره‌های اولیه و فواره‌های رقیق‌سازی ایجاد شده است. این ناحیه به دلیل حضور اثرات جریان‌های چرخشی بزرگ حائز اهمیت است. مقطع $X = 0.18\ m$ در پایین‌دست فواره‌های رقیق‌سازی قرار دارد که نشان دهنده سرعت تقریبی جریان خروجی از محفظه است. این مقطع به این دلیل انتخاب شده‌اند که داده‌های تجربی کافی [۱۳] وجود دارد. در مقطع $X = 0.04\ m$ ، کمتر بودن سرعت در نزدیکی محور طولی محفظه احتراق مدل ناشی از قرارگیری ناحیه بازگردش در ناحیه اولیه محفظه احتراق و برهم‌کنش برخورد سوخت با هوای چرخاننده و فواره‌های اولیه است. در مقطع $X = 0.1\ m$ به دلیل قرارگیری بین فواره‌های اولیه و رقیق‌سازی، بر سرعت جریان افزوده می‌شود. در مقطع $X = 0.2\ m$ ساختار سرعت متأثر از سرعت هوای قبل از فواره‌های رقیق‌سازی و سرعت سوخت نمی‌باشد و جریان به سمت یکنواختی پیش می‌رود. به طور میانگین اختلاف توزیع سرعت پیش‌بینی شده با داده‌های آزمایشگاهی نزدیک به ۱۷٪ است. این اختلاف می‌تواند ناشی از توزیع دمای متفاوت در حالت شبیه‌سازی به حالت تجربی و کاستی رهیافت RANS در شبیه‌سازی دقیق جریان‌های بازگشتی (قبل از فواره‌های هوا) باشد.

با توجه به دقت مناسب و هزینه کمتر شبکه "ج" نسبت به سه شبکه دیگر، از شبکه "ج" جهت شبیه‌سازی نهایی جریان درون محفظه استفاده می‌شود. شکل ۳ شبکه نهایی مورد استفاده برای شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، در نواحی که گرادبان سرعت و غلظت دارای شیب تند بوده، بر تراکم سلول‌ها اضافه گردیده است. با توجه به استفاده از مدل آشفتگی $k - \epsilon$ Realizable برای شبیه‌سازی جریان آشفتنه، تراکم سلول‌های نزدیک به دیواره‌ها و فاصله اولین سلول بر حسب واحد دیواره به گونه‌ای انتخاب شده است که Y^+ در محدوده ۳۰ برای اعمال تابع دیواره استاندارد لاندرا اسپالدینگ [۳۳] باشد.



شکل ۲- بررسی عدم وابستگی حل مساله به تعداد سلول‌های محاسباتی



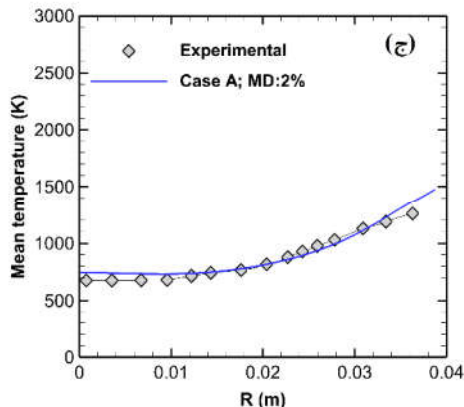
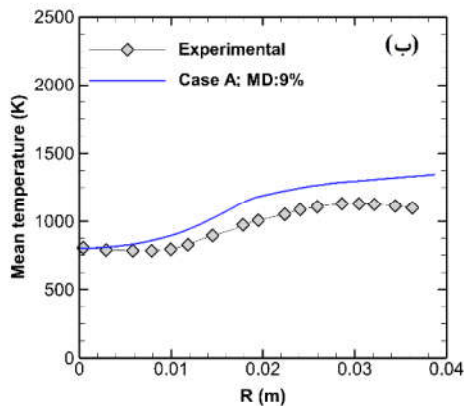
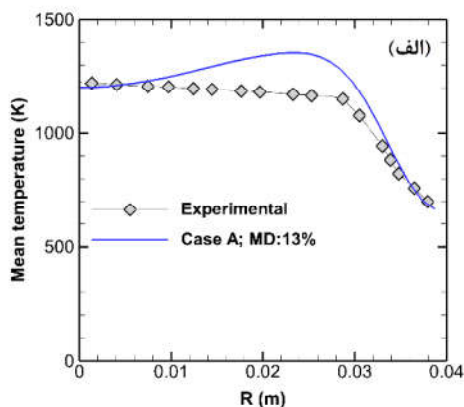
شکل ۳- شبکه نهایی محفظه احتراق WJCC

نتایج

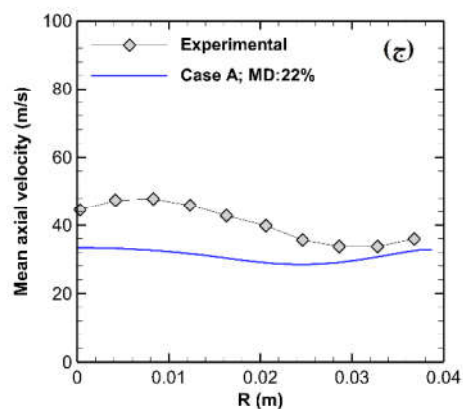
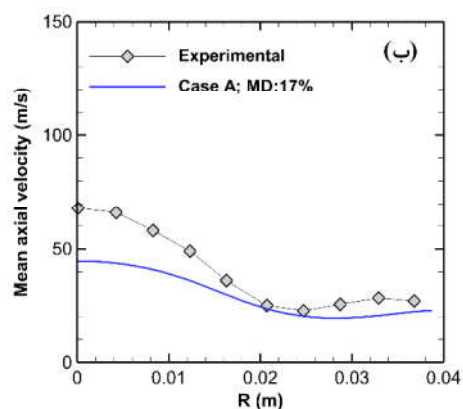
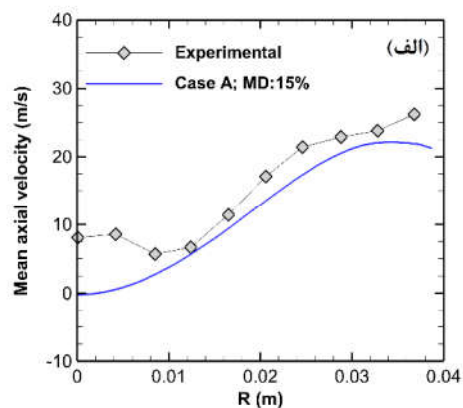
ارزیابی نتایج

در ابتدا نتایج شبیه‌سازی حالت اول با داده‌های تجربی مقایسه می‌گردد. بدین منظور سرعت، دمای جریان واکنشی در

داده‌های تجربی مشاهده می‌شود می‌تواند ناشی از نامتقارنی نازل سوخت در تست آزمایشگاهی باشد که در شکل‌گیری توزیع دمای ناهمگون در نتایج تجربی تاثیر گذاشته است [۱۳]. در مجموع دمای متوسط جریان به طور متوسط با اختلاف کمتر از ۹٪ نسبت به نتایج آزمایشگاهی بدست آمده است.



شکل ۵- مقایسه دمای متوسط جریان با داده های تجربی؛ الف: $X=0.03\text{ m}$ ، ب: $X=0.1\text{ m}$ و ج: $X=0.18\text{ m}$



شکل ۴- مقایسه سرعت متوسط محوری با داده های تجربی؛ الف: $X=0.04\text{ m}$ ، ب: $X=0.1\text{ m}$ و ج: $X=0.18\text{ m}$.

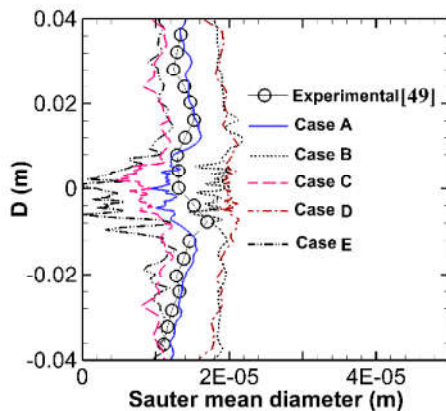
در شکل ۵ توزیع دمای حاصل از شبیه سازی‌ها در سه مقطع مختلف با داده‌های آزمایشگاهی [۱۳] مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. بر این اساس، مدل فلیلمت پایا در تمامی مقاطع تخمین دمای نسبتاً مناسبی ارائه نموده است. اندک اختلاف دمایی که در پروفیل‌های دمایی بین نتایج شبیه‌سازی و

ارائه شده‌اند. حالت اول مطابق با شرایط آزمایشگاهی بوده و در چهار حالت بعد، زاویه و سرعت نسبی پاشش سوخت مطابق با جدول ۱ تغییر یافته‌اند.

جدول ۱- شرایط پاشش سوخت در پنج حالت مختلف

Case	Spray half angle (deg)	Relative velocity (m/s)
A	30	110
B	30	95
C	30	125
D	20	110
E	40	110

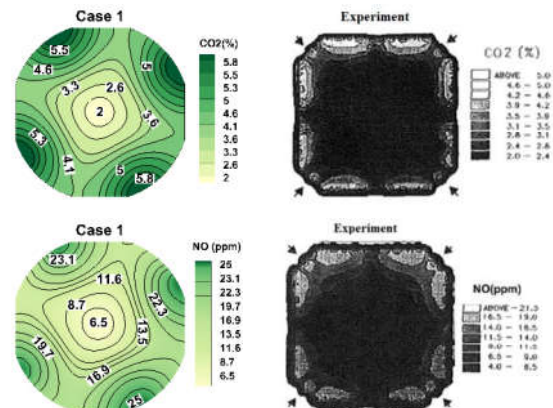
در شکل ۷ اختلاف SMD قطرات تحت تأثیر سرعت و زاویه پاشش مختلف سوخت نشان داده شده است. توزیع قطر متوسط قطرات در حالت اول تطابق قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی [۳۴] دارد. در مقایسه‌ی حالات اول تا سوم، به بررسی اثر سرعت نسبی پاشش بر SMD قطرات پرداخته شده است. با کاهش سرعت نسبی پاشش (حالت دوم)، SMD قطرات سوخت افزایش پیدا کرده است که علت این پدیده کاهش تنش بین جریان هوا و قطرات سوخت می‌باشد. در حالی که در حالت سوم با افزایش سرعت نسبی پاشش SMD قطرات کاهش یافته است. در مقایسه‌ی حالات اول، چهارم و پنجم، به بررسی اثر زاویه پاشش بر SMD قطرات پرداخته شده است. کاهش زاویه پاشش در حالت چهارم همانند حالت دوم افزایش SMD قطرات را در پی داشته است. افزایش زاویه پاشش هم‌چنین منجر به کاهش SMD قطرات شده است. در کل می‌توان بیان کرد سرعت و زاویه پاشش با اثرگذاری بر میزان تنش بین جریان هوا و قطرات سوخت عاملی مؤثر بر SMD قطرات سوخت می‌باشند.



شکل ۷- مقایسه پارامتر SMD برای پنج حالت مختلف پاشش در مقطع $X = 0.0152 \text{ m}$

شکل ۶ غلظت گونه‌های CO_2 و NO در مقطع خروجی محفظه احتراق ($X = 0.32 \text{ m}$) را نشان می‌دهد. مقایسه کیفی بین غلظت گونه CO_2 حاضر برای حالت اول و داده تجربی موجود نشانگر یک تطابق قابل قبول است. غلظت CO_2 در مرکز کاهش و با نزدیک شدن به دیواره افزایش می‌یابد که این موضوع با پروفیل‌های دما در ناحیه ثانویه مطابقت دارد.

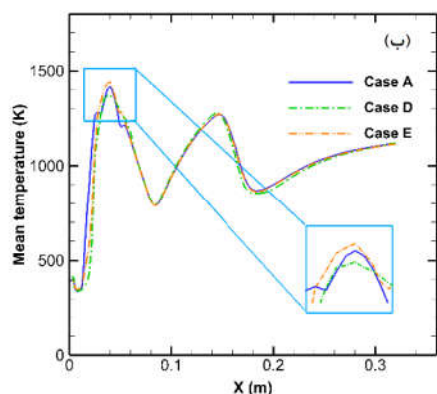
پیش‌بینی غلظت آلاینده NO از چالش‌برانگیزترین موضوعات مهندسی است. بالغ بر ۷۰ درصد NO تولیدی در محفظه‌های احتراق کلاسیک توربین گاز، متعلق به NO حرارتی بوده که غلظت آن به شدت به دمای شعله، غلظت رادیکال‌های $[\text{O}]$ و $[\text{OH}]$ و نحوه خنک‌کاری آن توسط فواره‌های هوا وابسته است. بر اساس آنچه در توضیحات برای توزیع غلظت گونه CO_2 بیان گردید، بیشترین مقادیر غلظت NO در نزدیکی دیواره محفظه احتراق مشاهده می‌شود. بین غلظت آلاینده NO تجربی و غلظت حاصل از شبیه‌سازی حالت اول مقداری اختلاف مشاهده می‌شود. یکی از دلایل آن می‌تواند ناشی از اختلاف ۸٪ بین دمای داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی حاضر باشد. دلیل دیگر آن می‌تواند ناشی از چگونگی محاسبه رادیکال‌های $[\text{O}]$ و $[\text{OH}]$ باشد که در شبیه‌سازی حاضر از نگرش تعادلی نسبی استفاده شده است.



شکل ۶- مقایسه کیفی توزیع غلظت گونه‌های NO و CO_2 در مقطع خروجی محفظه احتراق مدل با داده‌های تجربی

شرایط مختلف سوخت ورودی

در ادامه نتایج حل عددی برای کمیت‌های فیزیکی SMD قطرات سوخت، دما، دی اکسید کربن، مونو اکسید کربن و مونو اکسید نیتروژن در پنج حالت از شرایط مختلف پاشش سوخت

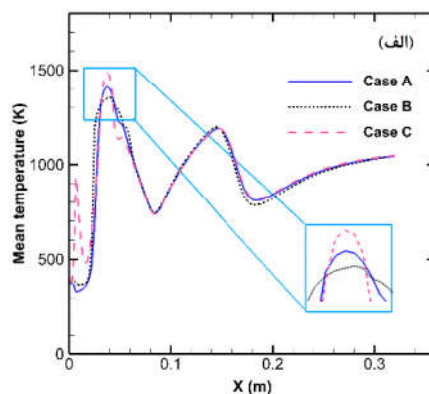


شکل ۸- تاثیر شرایط پاشش سوخت بر توزیع دمای متوسط جریان روی محور مرکزی محفظه احتراق؛ الف) سرعت و ب) زاویه پاشش

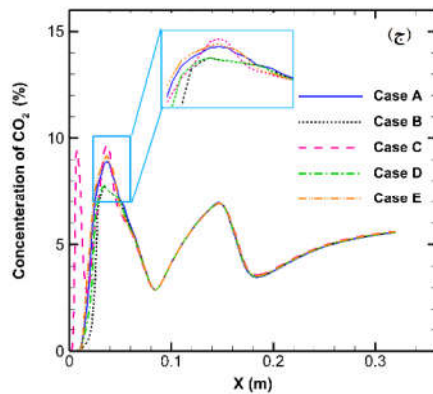
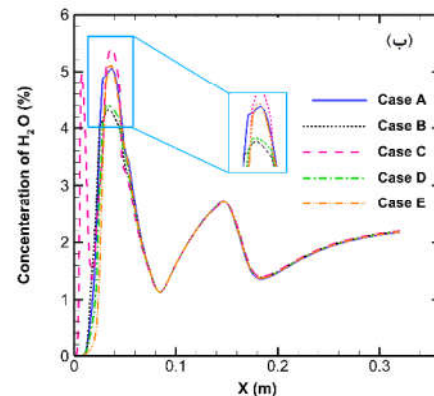
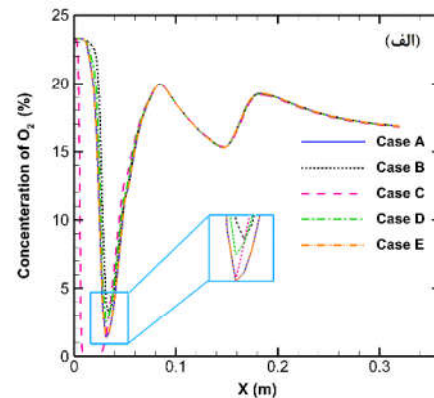
شکل ۹ تاثیر چگونگی پاشش سوخت بر غلظت گونه های احتراقی روی محور مرکزی محفظه نشان می دهد. بیشترین تاثیر بر توزیع غلظت گونه ها، در نزدیکی نازل سوخت و محل تشکیل شعله مشاهده می شود. غلظت گونه های شیمیایی با نرخ پیشروی واکنش ها، زمان ماندگی و کیفیت فرآیند اختلاط کنترل می شود. افزایش سرعت و زاویه پاشش سوخت به دلیل افزایش نرخ تبخیر و افزایش اختلاط سوخت و گاز های داغ موجب تکامل فرآیند احتراق و تسریع پیشروی واکنش های شیمیایی می شود. هرچقدر واکنش های شیمیایی مکانیزم احتراق سریع تر باشند نرخ مصرف O_2 و تولید CO_2 و H_2O که محصولات احتراق کامل هستند در ناحیه ی شعله بیشتر می شود. بالعکس کاهش زاویه و سرعت نسبی پاشش باعث ناقص ماندن احتراق می شوند که این موضوع از منحنی های حالات دوم و چهارم در شکل ۹ بخش (ب) و (ج) قابل برداشت است. میزان H_2O و CO_2 رابطه ی مستقیم با دمای محفظه ی احتراق دارد، یعنی هر قدر میزان این گونه ها بیش تر باشد قطعاً دمای محفظه بالاتر خواهد بود و احتراق سوخت کامل تر انجام شده است. در حالی که میزان O_2 رابطه ی معکوس با دمای محفظه و تکامل احتراق دارد. از این رو می توان به رابطه بین غلظت CO_2 و H_2O و غلظت آلاینده ی NO پی برد. زیرا اصلی ترین عامل تشکیل اکسیدهای نیتروژن دمای بالای متمرکز در ناحیه ی شعله است. بنابراین می توان گفت بین غلظت گونه های CO_2 و H_2O و غلظت آلاینده ی NO رابطه مستقیمی وجود دارد.

افزایش سرعت پاشش اسپری سوخت تشدید حرکت نسبی بین قطرات سوخت و گاز اطراف آن را در پی دارد که ذاتاً افزایش نرخ تبخیر قطرات و اختلاط بین بخار سوخت و جریان گاز را باعث می شود. این مسئله بدون شک موجب ترویج احتراق در ناحیه اولیه و دمای شعله بالاتر می شود. در حالت سوم که سرعت پاشش بالاتری دارد سبب تغییر شکل ظاهری نمودار نسبت به دیگر حالات می گردد. با کاهش $13/6\%$ سرعت پاشش سوخت (از 110 m/s به 95 m/s)، حداکثر دمای درون محفظه احتراق از 1411 K به 1351 K کاهش می یابد. این در حالی است که با افزایش 15 واحدی سرعت نسبت به حالت مرجع A، بیشینه دما 76 K افزایش می یابد.

عموماً پاشش در ناحیه بازگردش پایین دست چرخاننده قرار می گیرد. هر قدر زاویه پاشش کوچک تر باشد، قطره های حاصل از پاشش در ناحیه ی کوچک تری متمرکز می شوند و نسبت سوخت به هوا در این ناحیه افزایش قابل توجهی خواهد داشت. در نتیجه احتراقی غنی و در ناحیه ای کوچک رخ می دهد که دمای پایین تر در محفظه را در پی دارد. این موضوع در شکل ۸ از مقایسه بین منحنی قابل مشاهده است. همچنین هر قدر زاویه ی پاشش بیشتر باشد، قطره ها توزیع غیر یکنواختی در ناحیه ی اولیه خواهند داشت. نرخ تبخیر پاشش قطرات افزایش می یابد و اختلاط بین بخار سوخت و گاز محیط کامل تر می شود و وضعیت احتراق در ناحیه ی اولیه در حد قابل توجهی بهبود می یابد. این موضوع منجر به دمای شعله ی بالاتر در ناحیه ی اولیه محفظه می گردد. با کاهش 10 درجه ای نیم زاویه پاشش سوخت، بیشینه دمای درون محفظه احتراق 43 K کاهش می یابد. با ازدیاد 10 درجه ای نیم زاویه پاشش، بیشینه دما، 20 K افزایش می یابد.



منحنی تغییرات مقدار کسر مولی گونه O_2 دارای دو قله و دو قعر می‌باشد. کاهش اولیه مقدار کسر مولی گونه O_2 و رسیدن به نقطه مینیمم ناشی از ناحیه اصلی احتراق و مصرف اکسیژن طی واکنش‌ها است. با تزریق هوا از طریق جت‌های اولیه مقدار O_2 پس از ناحیه احتراق زیاد می‌شود و دوباره با تکامل فرآیند احتراق و مصرف O_2 مقدار این گونه تا پیش از رسیدن به فواره‌های ثانویه کاهش می‌یابد. در ناحیه فواره‌های ثانویه مقدار O_2 افزایش می‌یابد و بعد از آن مقدار O_2 به یک حالت تعادلی و ثابت تا انتهای محفظه می‌رسد.



شکل ۹- تأثیر شرایط پاشش سوخت بر توزیع غلظت گونه‌های؛ الف) O_2 ، ب) H_2O ، ج) CO_2

غلظت آلاینده NO برحسب ppm روی محور طولی محفظه احتراق در شکل ۱۰ نشان داده شده است. روند نمودارهای غلظت CO_2 ، H_2O و NO به همراه محل نقاط اکسترمم آنها، شبیه به نمودار دما می‌باشد. در محل‌هایی که هوا از سوراخ‌های اولیه و رقیق‌سازی وارد محفظه احتراق می‌گردد، بر غلظت اکسیژن افزوده شده و متعاقباً از غلظت دیگر اجزای شیمیایی کاسته می‌شود. در این دو محل، از دمای محفظه احتراق نیز کاسته می‌شود. با ورود بیشتر هوا در طول محفظه احتراق، بر کسر جرمی نیتروژن افزوده شده و با واکنش آن با اکسیژن داغ درون محفظه احتراق، بر غلظت گونه NO افزوده می‌شود.

اساساً اکسیدهای نیتروژن در نواحی داغ محفظه که گونه‌های اکسیژن و نیتروژن کافی وجود داشته باشند تشکیل می‌شوند. مطابق با شکل ۶، بیشینه مقدار NO در گوشه‌های محفظه که محل ورودی فواره‌های هوا و نیز نزدیک به محل تجمع گازهای داغ است مشاهده می‌شود. به طور کلی می‌توان گفت محل اصلی تشکیل آلاینده NO ، ناحیه اولیه محفظه احتراق تا پیش از فواره‌های رقیق‌سازی است که شرایط دما و زمان ماندگی کافی دارد. درعین حال ورود هوای اضافی از جت‌های رقیق‌سازی به درون محفظه و افزایش نیتروژن موجود در محفظه احتراق همچنان سبب شیب صعودی غلظت آلاینده NO در طول محفظه احتراق می‌شود. با توجه به شکل ۷ و مقایسه‌ی منحنی‌های حالات اول، دوم و چهارم قابل مشاهده است که کاهش سرعت و زاویه پاشش سوخت پاش که موجب

• بیشترین مقادیر غلظت NO در نزدیکی دیواره محفظه احتراق مشاهده می‌شود. بین غلظت آلاینده NO تجربی و غلظت حاصل از شبیه‌سازی مقادیر اختلاف مشاهده می‌شود. یکی از دلایل آن می‌تواند ناشی از اختلاف ۸٪ بین دمای داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی حاضر باشد.

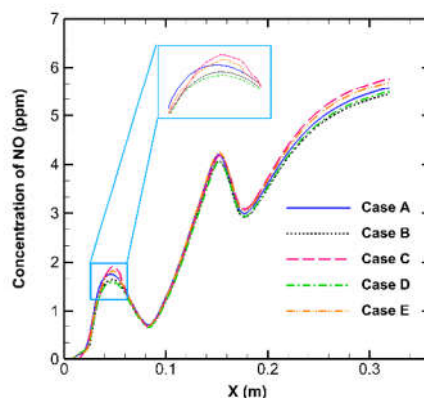
• روند نمودارهای غلظت H_2O ، CO_2 و NO بر روی محور طولی محفظه احتراق به همراه محل نقاط اکسترمم آنها، شبیه به نمودار دما می‌باشد. در محل‌هایی که هوا از سوراخ‌های اولیه و رقیق‌سازی وارد محفظه احتراق می‌گردد، بر غلظت اکسیژن افزوده شده و متعاقباً از غلظت دیگر اجزای شیمیایی کاسته می‌شود. در این دو محل، از دمای محفظه احتراق نیز کاسته می‌شود. بنابراین می‌توان گفت بین غلظت گونه‌های H_2O و CO_2 و غلظت آلاینده‌ی NO رابطه‌ی مستقیمی وجود دارد.

• سرعت و زاویه پاشش سوخت با اثرگذاری بر میزان تنش بین جریان گازها و قطرات سوخت عاملی موثر بر SMD قطرات سوخت هستند. بدین ترتیب که افزایش سرعت و زاویه پاشش منجر به کاهش SMD قطرات می‌شود.

• افزایش سرعت پاشش اسپری سوخت تشدید حرکت نسبی بین قطرات سوخت و گاز اطراف آن را در پی دارد که ذاتاً افزایش نرخ تبخیر قطرات و اختلاط بین بخارات سوخت و جریان گاز را باعث می‌شود. این مسئله موجب ترویج احتراق در ناحیه اولیه و دمای شعله بالاتر می‌شود و نهایتاً موجب افزایش مقدار آلاینده NO می‌شود.

• هرچه قدر زاویه پاشش کوچکتر باشد قطره‌های حاصل از پاشش در ناحیه‌ی کوچکتری متمرکز می‌شوند. بنابراین نسبت سوخت به هوا در این ناحیه افزایش قابل توجهی خواهد داشت. در نتیجه احتراقی غنی در ناحیه‌ای کوچک رخ می‌دهد که دمای پایین‌تر را در پی دارد و موجب کاهش آلاینده NO می‌شود.

افزایش SMD قطرات و کاهش دما می‌شود، کاهش مقدار NO را نیز در پی دارد. در حالی که در حالت‌های سوم و پنجم به ترتیب با افزایش سرعت و زاویه پاشش کاهش قطر قطرات، افزایش نرخ تبخیر قطرات، اختلاط بهتر سوخت و گازهای داغ حاصل می‌شود که در نتیجه منجر به احتراق کامل‌تر و دمای شعله‌ی بالاتر می‌گردد، افزایش غلظت آلاینده‌ی NO در منحنی‌های حالت‌های سوم و پنجم نیز حاصل همین ازدیاد دمای شعله است.



شکل ۱۰- تاثیر شرایط پاشش سوخت بر توزیع غلظت آلاینده NO روی محور طولی محفظه

۶- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تاثیر شرایط مختلف پاشش سوخت بر مشخصه‌های جریان واکنشی اعم از سرعت، دما و غلظت گونه‌ها پرداخته شده است. بررسی به صورت عددی و با رهیافت RANS، مدل احتراقی فلیملت، مدل انتقال حرارت تشعشعی جهات مجزا با نگرش اویلر-لاگرانژ انجام شده و نتایج زیر حاصل شده است.

• دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی از مقایسه پارامترهای سرعت متوسط محوری، دما، قطر قطرات و غلظت گونه‌های NO و CO_2 با داده‌های آزمایشگاهی موجود ارزیابی شده است. نتایج عددی حاضر به طور قابل قبولی به داده‌های تجربی نزدیک هستند. به طور متوسط بالاترین اختلاف بین نتایج حل عددی و تجربی ۲۲٪ است که در مولفه محوری سرعت جریان واکنشی ایجاد شده است.

پی‌نوشت

۱ Durdina

۲ Sauter Mean Diameter (SMD)

- .۵ Datta, A. and S. Som, *Effects of spray characteristics on combustion performance of a liquid fuel spray in a gas turbine combustor*. International journal of energy research, 1999. **23**(3): p. 217-228.
- .۶ Kannaiyan, K. and R. Sadr, *Experimental investigation of spray characteristics of alternative aviation fuels*. Energy Conversion and Management, 2014. **88**: p. 1060-1069.
- .۷ Chen, F., et al., *Effects of fuel variation and inlet air temperature on combustion stability in a gas turbine model combustor*. Aerospace Science and Technology, 2019. **92**: p. 126-138.
- .۸ Shin, J., et al., *Effects of the physical properties of fuel on spray characteristics from a gas turbine nozzle*. Energy, 2020. **205**: p. 118090.
- .۹ Kankashvar, B., et al., *Experimental study of the effect of the spray cone angle on the temperature distribution in a can micro-combustor*. Aerospace Science and Technology, 2021. **115**: p. 106799.
- .۱۰ Sadatakhavi, S., et al., *Numerical and experimental study of the effects of fuel injection and equivalence ratio in a can micro-combustor at atmospheric condition*. Energy, 2021. **225**: p. 120166.
- .۱۱ Ibrahim, I.A., et al., *Numerical study of kerosene spray and combustion characteristics using an air-blast atomizer*. Energy Reports, 2022. **8**: p. 5974-5986.
- .۱۲ Wang, Z., et al., *Experimental study on effects of prefilming and non-prefilming atomization on the combustion characteristics in a realistic full annular combustor*. Fuel, 2023. **334**: p. 126545.
- .۱۳ Cameron, C., et al., *A detailed characterization of the velocity and thermal fields in a model can combustor with wall jet injection*. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1989. **111**(1): p. 31-35.
- .۱۴ Bazdidi-Tehrani, F., M.S. Abedinejad, and H. Yazdani-Ahmadabadi, *Influence of Variable Air Distribution on Pollutants Emission in a Model Wall Jet Can Combustor*. Heat Transfer Research, 2018. **49**: p. 1667-1688.

- ۳ Broniarz
- ۴ Liu
- ۵ Dafsari
- ۶ Datta
- ۷ Chen
- ۸ Shin
- ۹ Kankashvar
- ۱۰ Pattern Factor
- ۱۱ Wang
- ۱۲ Airblast
- ۱۳ Pre-film
- ۱۴ Steady Flamelet Combustion Model
- ۱۵ Discrete Ordinate Radiation Model
- ۱۶ Euler-Lagrange
- ۱۷ Sherwood number
- ۱۸ Spalding mass transfer number
- ۱۹ Root Mean Square
- ۲۰ Zeldovich
- ۲۱ De Soete
- ۲۲ Discrete transfer radiation model
- ۲۳ Rosseland
- ۲۴ Central Difference
- ۲۵ Upwind
- ۲۶ Simple C
- ۲۷ Cameron
- ۲۸ Wall Jet Can Combustor
- ۲۹ Samuelsen
- ۳۰ Jet
- ۳۱ Swirl Number
- ۳۲ Solidity
- ۳۳ Mean Deviation

منابع و مراجع

References

- .۱ Durdina, L., J. Jedelsky, and M. Jicha, *Investigation and comparison of spray characteristics of pressure-swirl atomizers for a small-sized aircraft turbine engine*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014. **78**: p. 892-900.
- .۲ Broniarz-Press, L., et al., *The effect of orifice shape and the injection pressure on enhancement of the atomization process for pressure-swirl atomizers*. Crop Protection, 2016. **82**: p. 65-74.
- .۳ Liu, C., et al., *Experimental investigations of spray generated by a pressure swirl atomizer*. Journal of the Energy Institute, 2019. **92**(2): p. 210-221.
- .۴ Dafsari, R.A., et al., *Viscosity effect on the pressure swirl atomization of an alternative aviation fuel*. Fuel, 2019. **240**: p. 179-191.

- Distribution on Reactive Flow in a Gas Turbine Model Combustion Chamber*. Fuel and Combustion, 2015. **8**(2): p. 13-32.
- .۲۶ Bazdid tehrani, F., S. Mirzaee, and M.S. Abedinejad, *Influence of Chemical Reaction Mechanisms on the Combustion Characteristics in a gas turbine model combustor*. Fuel and Combustion, 2017. **9**(2): p. 71-94.
- .۲۷ Bazdidi Tehrani, F., S. Mirzaei, and M.S. Abedinejad, *Influence of number of laminar flame lets and their scalar dissipation rate on combustion characteristics in a gas turbine model combustor*. Aerospace Knowledge and Technology Journal, 2017. **6**(2): p. 55-71.
- .۲۸ Modest, M.F. and S. Mazumder, *Radiative heat transfer*. 2021: Academic press.
- .۲۹ Bazdidi-Tehrani, F., E. Sharifi-Sedeh, and M.S. Abedinejad, *Effects of alumina nanoparticles on evaporation and combustion characteristics of diesel fuel droplets*. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2023. **143**: p. 104713.
- .۳۰ Rahmanpour, M., R. Ebrahimi, and M. Shams, *Numerically gas radiation heat transfer modeling in chemically nonequilibrium reactive flow*. Heat and mass transfer, 2011. **47**: p. 1659-1670.
- .۳۱ Mohammadi, M. and M.S. Abedinejad, *Analysis of NO Formation and Entropy Generation in a Reactive Flow*. Aerospace, 2022. **9**(11): p. 666.
- .۳۲ Smith, T., Z. Shen, and J. Friedman, *Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model*. 1982.
- .۳۳ Launder, B.E. and D.B. Spalding, *The numerical computation of turbulent flows, in Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion*. 1983, Elsevier. p. 96-116.
- .۳۴ Cameron, C., J. Brouwer, and G. Samuelsen. *A model gas turbine combustor with wall jets and optical access for turbulent mixing, fuel effects, and spray studies*. in *Symposium (International) on Combustion*. 1989. Elsevier.
- .۱۵ Abedinejad, M.S., F. Bazdidi-Tehrani, and S. Mirzaei, *Investigation of turbulent flow structures in a wall jet can combustor: application of large eddy simulation*. The European Physical Journal Plus, 2021. **136**(6): p. 1-26.
- .۱۶ Abedinejad, M.S., *Analysis of Liquid Fuel Spray in an Evaporating Chamber*. Journal of Aeronautical Engineering, 2021.
- .۱۷ Gouesbet, G. and A. Berlemont, *Eulerian and Lagrangian approaches for predicting the behaviour of discrete particles in turbulent flows*. Progress in Energy and Combustion Science, 1999. **25**(2): p. 133-159.
- .۱۸ Morsi, S. and A. Alexander, *An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems*. Journal of Fluid mechanics, 1972. **55**(2): (p. 193-208.
- .۱۹ Sazhin, S.S., *Advanced models of fuel droplet heating and evaporation*. Progress in energy and combustion science, 2006. **32**(2): p. 162-214.
- .۲۰ Abedinejad, M.S., *Analysis of Spray Evaporation in a Model Evaporating Chamber: Effect of Air Swirl*. Journal of Thermal Science, 2023: p. 1-17.
- .۲۱ Alemi, E. and M.R. Zargarabadi, *Effects of jet characteristics on NO formation in a jet-stabilized combustor*. International Journal of Thermal Sciences, 2017. **112**: p. 55-67.
- .۲۲ Bazdidi-Tehrani, F., M.S. Abedinejad, and M. Mohammadi, *Analysis of Relationship between Entropy Generation and Soot Formation in Turbulent Kerosene/Air Jet Diffusion Flames*. Energy & Fuels, 2019.
- .۲۳ Bazdidi-Tehrani, F. and M.S. Abedinejad, *Influence of incoming air conditions on fuel spray evaporation in an evaporating chamber*. Chemical Engineering Science, 2018. **189**: p. 233-244.
- .۲۴ Shih, T.-H., et al., *A new k- ϵ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows*. Computers & fluids, 1995. **24**(3): p. 227-238.
- .۲۵ Bazdidi-Tehrani, F., H. Yazdani Ahmadabadi, and M.S. Abedinejad, *Analysis of Influence of Variable Airflow*