

تحلیل پاشش سوخت مایع در یک محفظه تبخیر

محمدصادق عابدی نژاد*

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران.

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۹)

چکیده

در جریان پاششی سوخت مایع، پدیده های مختلفی حضور دارند که در نظر گرفتن یا نگرفتن آن ها در شبیه سازی عددی، تاثیر زیادی بر هزینه و دقت محاسبات دارد. هدف از مقاله حاضر بررسی در نظر گرفتن یا نگرفتن پدیده هایی نظیر انتقال حرارت تشعشی، شکست ثانویه قطرات، گرانش و نوع مدل آشفستگی است. در این کار، پاشش قطرات سوخت مایع در هوای گرم، توسط روش اویلر- لاگرانژ مدل سازی می گردد. انتقال حرارت تشعشی با مدل جهات مجزا و شکست ثانویه قطرات با مدل TAB شبیه سازی می شوند. معادلات حاکم بر جریان به صورت ضمنی خطی سازی و به صورت مرتبه دو گسسته سازی می شوند. نتایج حاکی از آن است که در جریان پاششی تبخیری، گرانش و انتقال حرارت تشعشی تاثیر چندانی بر توزیع جریان و توزیع قطر قطرات سوخت در محفظه تبخیری ندارد و در نظر گرفتن آن ها انتقال حرارت تشعشی تنها سبب افزایش هزینه محاسبات می گردد. به علاوه، می توان از شکست قطرات صرف نظر نمود. نتایج نشان می دهند که توزیع سرعت محوری و توزیع قطر قطرات حاصل از شبیه سازی، تطابق قابل قبولی با داده های تجربی دارند. جایی که قطرات در ناحیه بازگردش قرار می گیرند و سرعت نسبی بالاتری بین هوای داغ و قطرات وجود دارد، قطرات بیشتری تبخیر می شوند.

واژه های کلیدی: جریان دو فاز، پاشش اویلر لاگرانژ، شکست ثانویه، گرانش، انتقال حرارت تشعشی، تبخیر قطرات

Analysis of Liquid Fuel Spray in an Evaporating Chamber

Mohammad Sadegh Abedinejad*

Abstract

During the liquid fuel spray, there are various phenomena that considering or not taking them into the numerical simulation has a great impact on the cost and accuracy of calculations. The purpose of this paper is to investigate whether or not to take into account phenomena such as radiation heat transfer, secondary breakup, gravity, and type of turbulence model. In this work, the spray of liquid fuel droplets in hot air is modeled by the Eulerian-Lagrangian approach. The radiation heat transfer and secondary breakup are simulated employing the discrete ordinates model and the TAB model, respectively. The flow governing equations are implicitly linearized and discretized of the second order. The results show that in evaporative spray flow, gravity and radiation heat transfer have a little effect on the behavior and the diameter distribution of fuel droplets in the evaporative chamber and considering them will only increase the cost of calculations. In addition, droplet breakup can be ignored. The results show that the obtained axial velocity distribution and the diameter distribution of the droplets from simulation have an acceptable agreement with the experimental data. Where the droplets are in the recirculation zone and being a higher relative velocity between the hot air and the droplets, more droplets evaporate.

Key words: Two-phase flow, Eulerian-Lagrangian spray, Secondary break-up, Gravity, Radiation heat transfer, Evaporation of droplets,

مقدمه

پاشش در موارد متعدد مهندسی اعم از خنک‌کاری و خشک کردن، پودر کردن فلزات، ایجاد رطوبت، پاشش رنگ و غیره کاربرد دارد. از جمله مهم‌ترین کاربردهای پاشش در احتراق هست. هنگامی که یک قطره سوخت وارد یک محیط با دمای بالا مانند محفظه احتراق می‌شود، قطره گرم و سپس بخار می‌شود و آن‌گاه بخار سوخت می‌سوزد و انرژی حرارتی لازم را فراهم می‌کند. در ساده‌ترین حالت مایعی که باید به صورت اسپری درآید با سرعت زیاد از یک سوراخ کوچک پاشیده می‌شود. کیفیت پودر شدن تأثیر شدیدی بر نرخ تبخیر اسپری دارد، زیرا سطح کلی مایع پاشیده شده را نسبت به حجم آن بیشتر می‌کند. اندازه و قطر قطرات تولیدی با توجه به کارکرد بسیار مهم است. برای مسائل مربوط به احتراق توربین گاز از طرفی کوچک بودن قطر قطرات باعث افزایش بازده و عملکرد موتور می‌شود ولی از طرف دیگر چنانچه اندازه بیش از حد کوچک باشد، قطرات، تکانه و نیروی لازم برای نفوذ در گازهای پرفشار را از دست می‌دهند و اثرات منفی بر عملکرد محفظه احتراق می‌گذرانند [۱]. کیفیت پاشش به عوامل مختلفی نظیر نوع سوخت‌پاش، شرایط پاشش سوخت (فشار، دما، زاویه پاشش و سرعت پاشش سوخت)، اندازه متوسط قطره، چگونگی توزیع، شکست اولیه و ثانویه قطرات سوخت و تبخیر آنها، آشفستگی جریان و نرخ انتقال حرارت بستگی دارد.

مطالعات بسیاری هم به صورت تجربی و هم شبیه‌سازی عددی در زمینه ویژگی‌های اسپری درون احتراق توربین گاز انجام شده است. تحقیقات شامل جریان‌های واکنشی و جریان‌های بدون واکنش است. تحقیقات بر روی جریان‌های بدون واکنش با هدف دستیابی به توزیع مناسب سرعت انجام می‌شود. زیرا ساختار جریان اصلی و مناطق گردش مجدد تأثیر مهمی بر تثبیت شعله دارند [۲]. برخی از تحقیقات تجربی با حالت بدون واکنش در مدل آبی انجام شده است [۳]. تمرکز این مطالعات بر توزیع اسپری و قطرات بوده است. به عنوان مثال، اندازه‌گیری سرعت و اندازه قطره توسط بولزن [۴] برای یک اسپری احتراق چرخشی گزارش شده است. سوخت با استفاده از یک سوخت‌پاش هواکمک به درون محفظه پاشیده می‌شود. او بین سرعت و اندازه قطرات یک همبستگی تشخیص داده است. قطرات بزرگتر تمایل دارند از سرعت فاز گاز بکاهند. آشفستگی فاز گاز بیشتر بر قطرات کوچکتر تأثیر می‌گذارد. وو و

همکاران [۵] طی تحقیقاتی که بر روی پاشش سوخت دیزل از یک نازل هواکمک داشتند به این نتیجه رسیدند که تعداد زیادی از قطرات از قطر کمی برخوردار بوده و تمایل به حرکت با جریان هوا دارند. لذا سرعت قطرات را می‌توان به عنوان یک تقریب از سرعت فاز گاز در نظر گرفت.

پوزش و همکاران [۶] به بررسی تجربی و عددی سایز قطرات و توزیع سرعت جریان برای یک نازل دو سوخته با سیالات آب، متانول و استون پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که کشش سطحی و ویسکوزیته سیال پاششی تأثیر زیادی بر توزیع سرعت جریان گاز و قطرات دارد. به طوری که با افزایش ویسکوزیته سیال، قطر میانگین قطرات افزایش می‌یابد. طارق و همکاران [۷] تأثیر مشخصه‌های فیزیکی سوخت و نسبت هوا به مایع را بر روی مشخصه‌های اسپری از یک نازل هوا انفجاری را به صورت تجربی بررسی کرده‌اند. بدین منظور سوخت Jet-A و آب را که کشش سطحی و ویسکوزیته متفاوتی دارند به عنوان سیال انتخاب کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد تفاوت بسیاری بین زاویه پاشش، توزیع سرعت و سایز قطرات سوخت Jet-A و آب وجود دارد. قطر میانگین قطرات Jet-A به دلیل کمتر بودن کشش سطحی، کوچکتر از قطر میانگین قطرات آب است. با افزایش نسبت هوا به مایع، سایز قطر میانگین قطرات هر دو کاهش می‌یابد.

سامرفلد و کیو [۸] به مبنای ایجاد یک مجموعه اطلاعات دقیق در خصوص پاشش و تبخیر قطرات، آزمایشاتی را انجام دادند که هم اکنون مورد استفاده گروه کثیری از مهندسان واقع می‌گردد. آن‌ها بدین منظور از دو استوانه داخل هم که هوای داغ از استوانه داخلی آن می‌گذرد استفاده کردند و یک سوخت‌پاش فشاری مخروطی در ورودی استوانه داخل قرار دادند. توزیع سرعت و سایز قطرات از مهم‌ترین خروجی‌های این گروه بوده است.

در حال حاضر، مدل‌های عددی مختلف به عنوان یک ابزار کلیدی جهت تحقیقات در حوزه جریان پاششی مورد استفاده قرار می‌گیرند. انتخاب مدل‌ها و نگرش‌های مناسب به موضوعات متعددی از جمله کارایی آن‌ها، زمان و حافظه مورد نیاز جهت پردازش محاسبات بستگی دارد. سه نگرش کلی اویلر-اویلر، لاگرانژ-لاگرانژ و اویلر-لاگرانژ برای مطالعات عددی جریان چند فاز استفاده می‌شود.

بر اساس مطالعات لوث [۹]، اکثر محققان در حوزه پاشش سوخت مایع از دیدگاه اوایلر- لاگرانژ استفاده نموده‌اند. گوپست و برلمونت [۱۰]، مطالعه جامعی روی پاشش قطرات انجام دادند. طبق بررسی آنها، با اتخاذ دیدگاه اوایلری برای فاز پیوسته و دیدگاه لاگرانژی برای فاز گسسته، نتایج قابل قبولی حاصل می‌شود. آناند و جنی [۱۱] از نگرش اوایلر-لاگرانژ برای مدل کردن جریان تبخیری دوفاز استفاده کرده‌اند. تمرکز این مطالعه بر روی اثر قطرات سوخت بر روی مشخصات جریان گاز می‌باشد و به این نتیجه رسیده‌اند که با این مدل ارائه شده، نسبت به کارهای قبلی، اثرات فاز گسسته روی فاز پیوسته بهتر نمایان می‌شود. پرینی و ریتز [۱۲] مدل‌های ترکیبی مومنتوم، برخورد قطرات و شکست به همراه پاشش تبخیری گذرا را مورد مطالعه قرار دادند. آنها از سوخت‌پاش‌های فشار بالا تحت جریان آشفته استفاده کردند و از دیدگاه اوایلر- لاگرانژ نیز برای فازهای پیوسته و گسسته استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که خروجی مدل‌های استفاده شده با داده‌های تجربی تطابق مناسبی دارد.

هافمن و همکاران [۱۳] اسپری سوخت از یک اتمایزر هوا انفجاری مربوط به یک محفظه احتراق موتور هوایی را به کمک دیدگاه اوایلر-لاگرانژ شبیه‌سازی کرده‌اند. آن‌ها به نقش مهم شرایط شروع پاشش سوخت، شکست اولیه و تشکیل قطرات ابتدایی در توزیع قطرات درون محفظه احتراق پرداخته‌اند. بر اساس تحقیقات ایشان، قطر میانگین ساتر (SMD)^۱ قطرات با افزایش سرعت محوری اولیه قطرات کم می‌شود. از طرفی با افزایش سرعت عمودی اولیه، پهنا و زاویه پاشش سوخت افزایش می‌یابد.

قطرات اولیه حاصل از سوخت‌پاش، ممکن است تحت شرایطی مجدداً شکسته شوند. به طور معمول، برای مدل‌سازی این پدیده مدل‌های مختلفی نظیر مدل موجی، مدل آنالوژی شکست تیلور و مدل کلوین- هلمهولتز-رایلی-تیلور استفاده می‌شود [۱۴]. با این حال، تعدادی از محققان تاثیر شکست ثانویه قطرات را در مطالعات‌شان در نظر نگرفته‌اند [۶، ۱۵، ۱۶]. بافکر و همکاران [۱۷] به توزیع پاشش یک اتمایزر فشاری- چرخشی با استفاده از دیدگاه اوایلر- لاگرانژ پرداختند. جهت مدل‌سازی شکست اولیه سوخت ایزواکتان، از مدل پودرسازی صفحه‌ای ناپایدار خطی شده (LISA)^۲ استفاده کردند و از نتایج حاصل از این بخش به قطر میانگین ساتر (SMD)،

سرعت خروجی و ضخامت ورق سوخت دست پیدا کردند. آن‌ها جهت مدل‌سازی شکست ثانویه قطرات از مدل شکست آنالوژی تیلور (TAB)^۳ استفاده نمودند و دریافتند که SMD حاصل از مدل LISA با افزایش فشار سوخت‌پاش به آرامی تغییر می‌کند. آن‌ها بیان کردند که سرعت اولیه ورق نقش مهم‌تری در نرخ شکست و نفوذ دارد. ضمن اینکه با کاهش فشار سوخت‌پاش، SMD قطرات بزرگتر شده و عمق نفوذ پاشش کاهش پیدا می‌کند. آن‌ها بیان نمودند که ماکزیمم عدد وبر قطرات برای انژکتورهای فشاری بین ۹ تا ۲۰ می‌باشد.

برای مدل‌سازی جریان آشفته دو فازی، معمولاً از رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)^۴ و رهیافت معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز ناویر استوکس (RANS)^۵ استفاده می‌شود. رهیافت LES به نسبت از دقت بیشتر و هزینه محاسباتی بالاتری برخوردار است. در صورت استفاده از رهیافت RANS، مدل‌های آشفته‌گی $k - \epsilon$ استاندارد، $k - \epsilon$ Realizable، $k - \epsilon$ RNG و $k - \omega$ SST بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. بازدید طهرانی و همکاران [۱۸] بیان کرده‌اند که مدل $k - \epsilon$ Relizable می‌تواند به خوبی مشخصه‌های جریان پاششی سوخت مایع در یک محفظه احتراق را پیش‌بینی نماید. السود و بیروک [۱۹] انتقال حرارت و انتقال جرم از یک قطره در یک جریان هوای گرم آشفته را با استفاده از مدل $k - \omega$ SST برای فاز گاز مورد مطالعه قرار دادند. فیلهو و همکاران [۲۰] به بررسی عددی احتراق پاشش اتانول با استفاده از رهیافت آشفته‌گی RANS و مدل βPDF برای برهم‌کنش احتراق و جریان آشفته پرداختند. آن‌ها در این کار از روش اوایلر- لاگرانژ و اتصال دوطرفه بین فاز پیوسته و گسسته استفاده کرده و توزیع قطرات و تبخیر آن‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. در نهایت جهت اعتبارسنجی کار خود توزیع دما، سرعت و تابع احتمال جرم برحسب قطر قطرات را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار داده‌اند.

پاتل و منن [۲۱] به شبیه‌سازی برهم‌کنش شعله-جریان آشفته- پاشش در یک محفظه احتراق رقیق پرداخته‌اند. آن‌ها از رهیافت LES برای مدل‌سازی جریان آشفته و جهت بررسی

معادله حرکت قطرات مبتنی بر قانون دوم حرکت نیوتن است که مجموع نیروهای وارد بر جرم باعث شتاب آن می‌شود. مسیر حرکت قطرات از معادله حرکت به دست می‌آید.

$$\frac{d\vec{u}_d}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_d) + \frac{\vec{g}(\rho_d - \rho)}{\rho_d} + \vec{F} \quad (4)$$

عبارت سمت چپ، اینرسی یک قطره است که شرح‌دهنده مقاومت جرم برای تغییر سرعت و جهت آن است. اولین عبارت سمت دوم شرح‌دهنده نیروی پسای اصطکاکی است و به صورت زیر به دست می‌آید:

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re_d}{\rho_d d_d^2} \frac{1}{24} \quad (5)$$

در این جا، \vec{F} ، بیانگر نیروهای خارجی شتاب دهنده به قطره سوخت، \vec{u} سرعت فاز پیوسته، \vec{u}_d سرعت قطره، μ لزجت مولکولی فاز پیوسته، ρ چگالی فاز پیوسته، ρ_d چگالی قطره و d_d قطر قطره می‌باشد. Re_d عدد رینولدز نسبی قطره می‌باشد که به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$Re_d = \frac{\rho d_d |\vec{u}_d - \vec{u}|}{\mu} \quad (6)$$

ضریب پسای C_D برای مدل کردن وابستگی پیچیده بین قطره و شرایط سیال به کار می‌رود.

۲-۱- مدل سازی فاز پیوسته

بر اساس مطالعات پیشین [۲۲، ۲۳]، سه مدل آشفتگی از رهیافت RANS ($k - \epsilon$)، Realizable $k - \epsilon$ ، و SST $k - \omega$ جهت مدل سازی آشفتگی جریان دو فاز مورد استفاده قرار گرفته است. هر سه مدل تطابق کافی با فیزیک جریان آشفته دارند. با این حال، مدل SST $k - \omega$ حاوی یک عبارت محدود کننده است که لزجت‌های آشفتگی بزرگ غیر فیزیکی را مهار کند. بر همین اساس، این مدل کارایی مناسبی در جریان‌های حاوی لایه مرزی تحت گرادیان فشار مثبت، چرخشی و جدایی دارد. این مدل جزء مدل‌های دو معادله‌ای می‌باشد که توسط منتر ارائه شده است و شامل دو معادله مجزا برای انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ اضمحلال ویژه (ω) می‌باشد. تاثیر آشفتگی جریان بر توزیع قطرات در فاز گاز توسط مدل تصادفی walk در نظر گرفته شده است. جهت مدل سازی انتقال حرارت تشعشعی از مدل جهات مجزا استفاده شده است.

۲-۲- مدل سازی فاز گسسته قطرات

نحوه شکست قطرات نیز از مدل کلونین- هلمهولتز استفاده کرده‌اند. نتایج آن‌ها یک بار بدون مدل شکست قطرات و بار دیگر با احتساب مدل شکست قطرات حاصل گردیده است. در حالتی که شکست را در نظر گرفته‌اند، هدفشان بررسی تبخیر سوخت بوده است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که چرخش دادن به جریان، شعله را پایدارتر و نقش مهمی در توزیع قطرات دارد. با توجه به بررسی انجام شده، تاکنون تحقیقات جامعی در خصوص کاهش هزینه‌های محاسباتی شبیه‌سازی جریان پاشش سوخت مایع با رویکرد لحاظ نمودن فاکتورهای موثر بر دقت شبیه‌سازی انجام نشده است. بنابراین در این مقاله، به بررسی در نظر گرفتن اثر گرانش، انتقال حرارت تشعشعی، مدل آشفتگی و شکست ثانویه بر توزیع قطر و سرعت قطرات به همراه تغییرات دمای دیواره و نرخ دبی جرمی سوخت پرداخته می‌شود. هدف از این مقاله شناسایی یک ابزار عددی کاربردی و ساده جهت شبیه‌سازی عددی پاشش سوخت مایع با دقت قابل قبول است. بدین منظور هندسه سامرفلد و کیو [۸] شبیه‌سازی می‌گردد و با داده‌های تجربی مورد مقایسه قرار می‌گیرند. پاشش قطرات سوخت مایع و محیط دو فاز قطره و هوا توسط روش اویلر- لاگرانژی مدل‌سازی می‌گردند. برای مدل‌سازی انتقال حرارت تشعشعی از مدل جهات مجزا (DOM) و برای شکست ثانویه از مدل TAB استفاده شده است.

۲-۲- معادلات حاکم و مدل‌ها

معادلات حاکم بر فاز پیوسته (گاز) جریان پاششی آشفته شامل معادلات بقای جرم، بقای ممنتوم و بقای انرژی است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

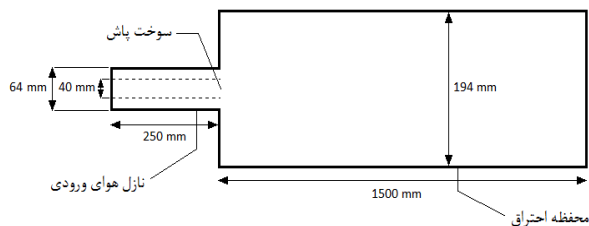
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = \dot{S}_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + F_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho \psi_k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j \psi_k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \alpha_k \frac{\partial \psi_k}{\partial x_j} \right) + \dot{S}_k \quad (3)$$

که u مولفه سرعت، \dot{S}_m انتقال جرم از قطرات سوخت مایع به فاز گازی، p فشار، ρ چگالی، ψ_k اسکالر دما، α_k ضریب دیفیوژن، و \dot{S}_k عبارت چشمه است که به عنوان منبع در نظر گرفته می‌شود.

داخل استوانه بزرگتر پاشیده می‌شود. با توجه به این که محفظه به صورت عمودی قرار گرفته است، شتاب گرانش زمین در جهت محوری حرکت هوای گرم مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱- شماتیک هندسه مورد بررسی در مقاله حاضر [۸]

دبی جرمی هوای ورودی $28/3 \text{ g/s}$ بوده که با سرعت 18 m/s بدون چرخش و با شدت آشفتگی 10% وارد محفظه می‌شود. اتیل الکل ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) با دمای 307 K و با دبی جرمی $0/44 \text{ g/s}$ و با سرعت پاشش 18 m/s و با زاویه 30° درجه از نازل سوخت پاشیده می‌شود. اطلاعات مربوط به این هندسه و مشخصات سوخت اتیل الکل در جدول‌های ۱ و ۲ ذکر گردیده‌اند.

جدول ۱- اطلاعات هندسی محفظه تبخیری مدل

پارامتر	محدوده
قطر داخلی نازل هوای ورودی (m)	0/040
قطر خارجی نازل هوای ورودی (m)	0/064
طول نازل هوای ورودی (m)	0/25
قطر محفظه (m)	0/194
طول محفظه (m)	1/500
نوع سوخت	Ethyl-alcohol
فشار کاری (kPa)	101/3

جدول ۲- مشخصات سوخت اتیل الکل

پارامتر	مقدار
چگالی (kg/m^3)	790
گرمای ویژه (J/kg.k)	2470
گرمای نهان (J/kg)	855237
نقطه جوشش (k)	351
لزجت (kg/m.s)	0/0012
تنش سطحی (N/m)	0/022348

جریان گاز به عنوان فاز پیوسته می‌باشد و به صورت اویلری مدل می‌شود. در ناحیه نزدیک به سوخت پاش، به دلیل پاشش قطرات میکرومتری و با کسر حجمی کمتر از 10% ، فاز گسسته‌ای ایجاد می‌گردد که برای مدل کردن آن از نگرش لاگرانژی استفاده می‌شود. در این پژوهش سوخت بر اساس مدل LISA پودر شده و قطرات سوخت طبق توزیع رزین- راملر با پارامتر توزیع $q = 3$ وارد محفظه می‌شوند. بر اساس پژوهش‌های انجام شده توسط فیس [24]، توزیع قطرات در ده کلاس مختلف از سایز قطرات در بازه $19 - 100 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده‌اند. هم‌چنین فرض می‌شود که قطرات پس از برخورد با دیواره به صورت انعکاسی مجدداً وارد دامنه محاسباتی می‌گردند.

برای مدل کردن دمای قطره از مدل دمایی یکنواخت (تعادلی) استفاده می‌شود. هم‌چنین فرض می‌گردد که تغییر دما درون قطره وجود ندارد و دمای داخل قطره همگن می‌باشد [25]. بنابراین قطرات گسسته‌سازی نمی‌شوند و هزینه محاسبات کاهش می‌یابد. انتقال حرارت روی سطح قطره، هم از طریق دیفیوژن و هم جابجایی صورت می‌پذیرد. برای مدل‌سازی شکست قطرات از مدل TAB استفاده شده است.

۳- معرفی هندسه و شرایط مرزی

جهت شبیه‌سازی پاشش سوخت از هندسه سامرفلد و کیو [۸] استفاده شده است (شکل ۱). آن‌ها پژوهش‌های بسیاری در حوزه پاشش انجام داده‌اند، به نحوی که هم‌اکنون جهت ارزیابی نتایج عددی، داده‌های تجربی‌شان مورد علاقه پژوهشگران حوزه‌های عددی و تجربی قرار می‌گیرد. در این کار از اتیل الکل ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) به عنوان سوخت مایع و از هوا به عنوان فاز پیوسته استفاده شده است. محفظه تست شامل سه ناحیه استوانه‌ای شکل می‌باشد که به یکدیگر متصل شده‌اند. طول استوانه‌های هم‌محور اول و دوم 500 میلی‌متر بوده و قطر آنها به ترتیب 40 و 64 میلی‌متر است. طول استوانه دیگر 1500 میلی‌متر بوده و با قطر داخلی 194 میلی‌متر در ادامه استوانه اول است. از ورودی فضای بین قطر خارجی و داخلی استوانه اول، هوا با دمای 373 K وارد می‌شود. در محل تقاطع و مرکز دو استوانه، سوخت پاش مخروطی قرار گرفته و سوخت با دمای 307 K به

۴- دیدگاه عددی

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

جهت اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی و مقایسه آن ها با داده های تجربی، از پارامتر اختلاف متوسط (MD) استفاده شده است.

$$MD = \frac{|Experimental\ data - Numerical\ results|}{Experimental\ data} \times 100 \quad (7)$$

۵- بحث و نتایج

در این بخش از مقاله، تاثیر چند عامل مانند مدل آشفتگی، انتقال حرارت تشعشعی، شکست ثانویه قطرات، گرانش و نوع مدل آشفتگی بر مدل سازی پاشش شرح داده می شوند و نتایج با داده های تجربی مقایسه می گردند.

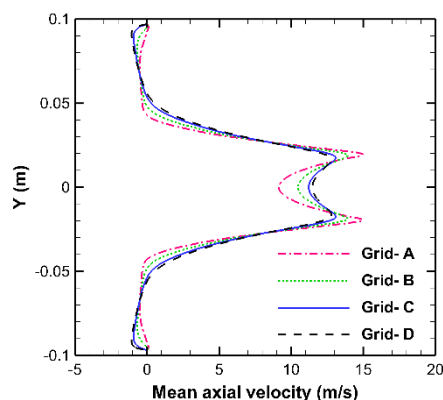
به منظور بررسی تاثیر پذیری شبیه سازی جریان پاششی غیر واکنشی از مدل آشفتگی به کار گرفته شده، سه مدل آشفتگی مختلف از رهیافت RANS مورد استفاده قرار گرفته اند. در شکل ۳ تاثیر مدل سازی آشفتگی جریان بر روی توزیع سایز و سرعت محوری قطرات نشان داده شده است. در مقطع $Z = 0.025\text{ m}$ تطابق مناسبی با اختلاف کمتر از ۲٪ بین نتایج حاصل از به کارگیری مدل $k - \omega$ SST با داده های آزمایشگاهی مشاهده می شود. این در حالی است که با به کارگیری مدل $k - \epsilon$ RNG، نزدیک به ۴۰٪ اختلاف بین پروفیل SMD شبیه سازی شده با داده های تجربی [۸] مشاهده می گردد. در مقطع $Z = 0.1\text{ m}$ ، با استفاده از مدل $k - \omega$ SST مقدار $MD = 1.2\%$ برای سرعت متوسط محوری حاصل می گردد. این در حالی است که اختلاف بین پروفیل های سرعت محوری قطرات و داده های تجربی برای مدل های $k - \epsilon$ RNG و $k - \epsilon$ Realizable، به ترتیب مقدارهای ۶/۵٪ و ۱۱٪ است. بیشترین اختلاف بین سه مدل به کار گرفته شده بر روی خط محوری محفظه برای پیش بینی توزیع سرعت و قطر قطرات

شرایط مرزی در ورودی و خروجی دامنه محاسباتی به ترتیب جریان جرمی ورودی و فشار خروجی لحاظ شده اند. دیوارها از طریق انتقال حرارت جابجایی با هوای بیرون تبادل حرارت دارند.

گسسته سازی هندسه توسط یک شبکه سازمان یافته انجام شده و در نواحی نزدیک به پاشش سوخت، به دلیل وجود پدیده های گرادیان فشار و پودر سازی سوخت، از سلول های ریزتری برای شبکه بندی استفاده شده است. جهت بررسی عدم وابستگی نتایج به تعداد سلول های محاسباتی، چهار سایز شبکه مختلف (جدول ۳) برای شبیه سازی جریان درون محفظه تبخیری مدل تولید گردیده و مطابق با شکل ۲ توزیع سرعت متوسط محوری در مقطع $X = 0.1\text{ m}$ برای این چهار شبکه مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به دقت و هزینه محاسباتی، تعداد سلول های محاسباتی شبکه سوم قابل قبول بوده و از شبکه سوم جهت شبیه سازی نهایی جریان استفاده گردیده است. ماکزیمم اختلاف بین دو پروفیل سرعت محوری شبکه سوم و چهارم برای جریان تک فاز (هوای داغ بدون پاشش قطرات سوخت) و دو فاز (هوای با پاشش قطرات سوخت)، به ترتیب ۰/۶۴٪ و ۰/۱۴٪ بوده است.

جدول ۳- سایز شبکه های محاسباتی مختلف

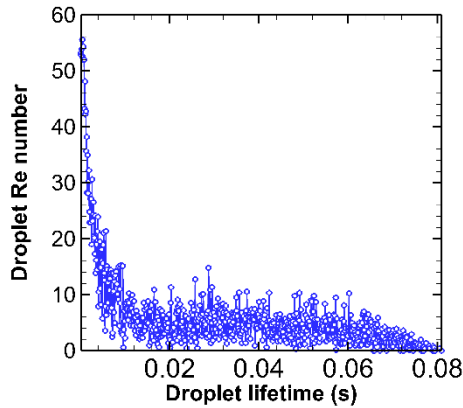
نام	تعداد شبکه
شبکه A	2.2×10^5
شبکه B	3.2×10^5
شبکه C	5.2×10^5
شبکه D	8.3×10^5



شکل ۲- آزمون استقلال از شبکه محاسباتی: سرعت متوسط

محوری در مقطع $Z=0.1\text{ m}$

از درجه 10^5 می‌باشد و جریان فاز گاز یک جریان با عدد رینولدز بالا محسوب می‌شود. بنابراین می‌توان گفت ماهیت جریان در نزدیکی سطح قطرات متفاوت از جریان فاز گاز بوده و یک جریان رینولدز پایین می‌باشد.

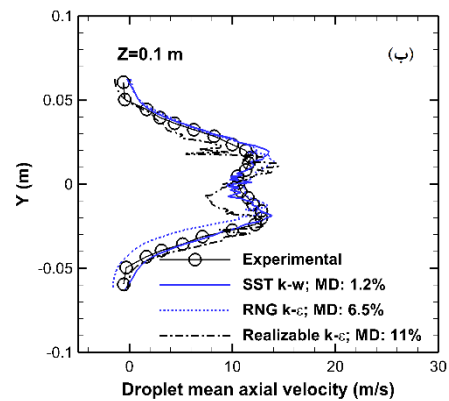
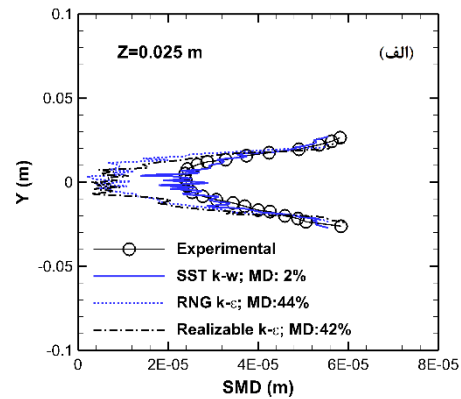


شکل ۴- عدد رینولدز قطره در بزرگ‌ترین سایز کلاس‌بندی قطرات

هر دو مدل $k - \varepsilon$ و $k - \varepsilon$ Realizable به عنوان مدل‌های آشفتگی رینولدز بالا شناخته می‌شوند و از قابلیت پایینی در جریان‌های رینولدز پایین برخوردار هستند. با توجه به شکل‌گیری جریان رینولدز پایین نزدیک سطح قطرات، لذا به کارگیری این دو مدل همراه با خطا می‌باشد. از طرفی مدل $k - \omega$ SST که دربرگیرنده قابلیت‌ها و ضعف‌های هر دو مدل $k - \varepsilon$ و $k - \omega$ می‌باشد، از توانایی خوبی برای مدل‌سازی جریان آشفته نزدیک سوخت‌پاش با حضور بالای قطرات برخوردار است. مطابق با شکل ۳، با دور شدن از سوخت‌پاش و تبخیر قطرات و وارد شدن آن‌ها به فاز گاز، تاثیر مدل‌های آشفتگی بر نتایج کاسته می‌شود.

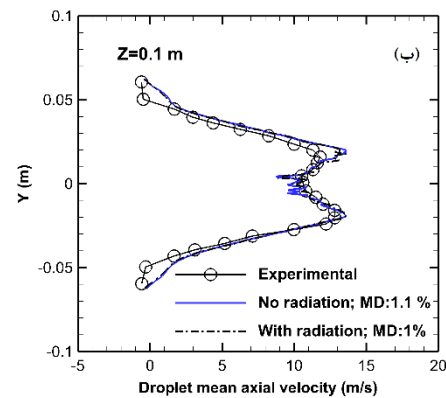
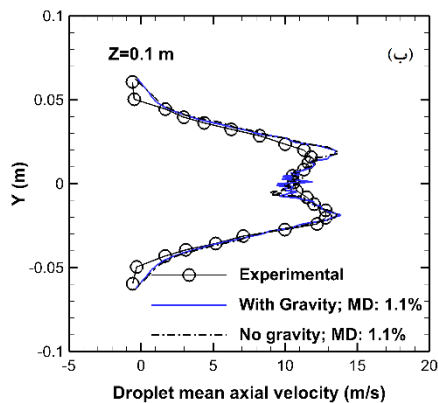
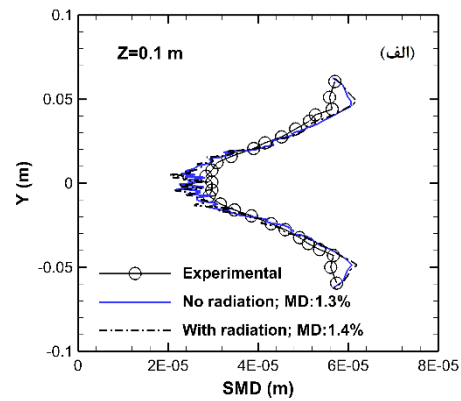
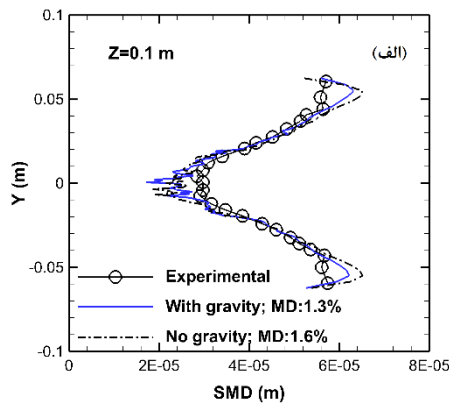
شکل ۵ تاثیر اهمیت حضور انتقال حرارت تشعشی در مقایسه با انتقال حرارت جابجایی اجباری و هدایت را بر توزیع سایز و سرعت قطرات در یک جریان پاششی غیرواکنشی نشان می‌دهد. بر این اساس مشاهده می‌شود که انتقال حرارت تشعشی تاثیر چندانی بر پیش‌بینی پارامترهای جریان غیرواکنشی ندارد و می‌توان در شبیه‌سازی‌ها از این عبارت صرف نظر نمود. این می‌تواند ناشی از دمای پایین جریان و دیواره‌ها در جریان غیر واکنشی باشد.

دیده می‌شود. این به دلیل وجود یک گرادیان فشار معکوس بالا و شکل‌گیری ناحیه بازگردش می‌باشد.



شکل ۳- مقایسه نتایج حاصل از به کارگیری سه مدل آشفتگی با داده‌های تجربی [۸]: الف) SMD در مقطع $Z=0.025$ m و ب) سرعت متوسط محوری قطرات در مقطع $Z=0.1$ m

بر اساس کارهای گذشته [۲۶، ۲۷]، هر دو مدل RNG $k - \varepsilon$ و $k - \varepsilon$ Realizable در جریان‌های پاششی واکنشی که عمر قطرات پایین است، پیش‌بینی قابل قبولی از پارامترهای جریانی داشته‌اند. با این حال، شکل ۳ نشان می‌دهد که در جریان‌های پاششی غیرواکنشی، مدل $k - \omega$ SST از قابلیت بالاتری نسبت به دو مدل دیگر برخوردار است. این می‌تواند ناشی از اختلاف بین اعداد رینولدز قطرات و فاز گاز باشد. مطابق با روابط ۵ و ۶ عدد رینولدز بحرانی قطرات نزدیک به ۱۰۰۰ می‌باشد. اگر عدد رینولدز قطرات کمتر از این مقدار باشد، جریان نزدیک به سطح قطرات از نوع رینولدز پایین منظور می‌گردد [۲۸، ۲۹]. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، ماکزیمم عدد رینولدز روی سطح قطرات از درجه ۱۰۰ می‌باشد. این در حالی است که عدد رینولدز برای جریان فاز گاز



شکل ۶- مقایسه نتایج حاصل با در نظر گرفتن و نگرفتن نیروی گرانش و داده‌های تجربی در مقطع $Z = 0.1\text{ m}$: الف) SMD (ب) سرعت محوری قطرات

شکل ۷- مقایسه نتایج حاصل با در نظر گرفتن و نگرفتن انتقال حرارت تشعشعی و داده‌های تجربی در مقطع $Z = 0.1\text{ m}$: الف) SMD (ب) سرعت محوری قطرات

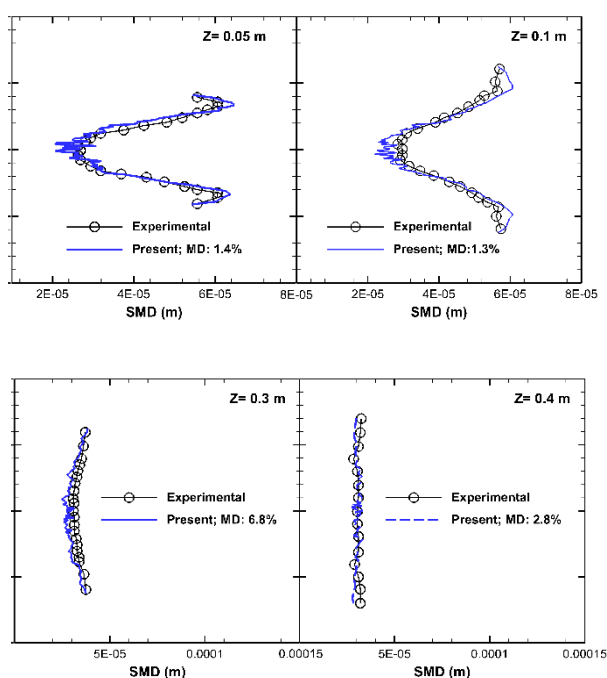
قطرات اولیه شکل گرفته از پارچه سوخت مایع (لیگامنت)، ممکن است مجدداً به قطرات ریزتر شکسته شوند که اصطلاحاً شکست ثانویه نامیده می‌شوند. می‌توان از توزیع عدد بدون بعد وبر (رابطه ۸) جهت پیش‌بینی رخداد شکست ثانویه قطرات استفاده نمود. زمانی که نیروی آیرودینامیکی بر نیروی اینرسی غلبه کند، سطح قطره می‌شکند و اگر این نیروی مخرب آیرودینامیکی ادامه یابد، قطره در یک عدد وبر بحرانی (نزدیک به یک) می‌شکند.

$$We = \frac{\rho_g u_{re}^2 d_p}{\sigma} \quad (8)$$

در شکل ۷ توزیع عدد وبر بر روی سایز ماکزیمم کلاس‌بندی قطرات و در شکل ۸ تاثیر در نظر گرفتن و نگرفتن شکست ثانویه قطرات بر روی توزیع SMD نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ماکزیمم عدد وبر نزدیک به یک می‌باشد و لذا پیش‌بینی می‌گردد که شکست قطرات در این هندسه رخ نمی‌دهد. با این حال با توجه به پراکندگی

با توجه به این که در تست آزمایشگاهی، محفظه تبخیری مدل به صورت ایستاده مورد آزمایش قرار گرفته است، در این بخش به بررسی اثر نیروی گرانش زمین و متعاقباً انتقال حرارت جابجایی طبیعی بر روی توزیع قطر و سرعت قطرات پرداخته می‌شود (شکل ۶). با توجه به این که در نظر گرفتن گرانش زمین تنها ۰/۳ درصد سبب بهبود پیش‌بینی سایز قطرات شده است و تأثیری بر پیش‌بینی سرعت قطرات نداشته است، می‌توان دو نتیجه گرفت، یک این که در مسائل پیچیده پاشش جهت ساده‌سازی حل، می‌توان از اثر گرانش صرف نظر نمود. دوم این که می‌توان محفظه تبخیری را به صورت افقی تست کرد؛ زیرا تفاوتی در نتایج تست عمودی و یا افقی محفظه تبخیری حاصل نمی‌گردد. زیرا با توجه به جریان اجباری قوی ناشی از ورود هوا و سوخت به درون محفظه، نرخ انتقال حرارت جابجایی اجباری نسبت به جابجایی طبیعی بسیار بالاتر است.

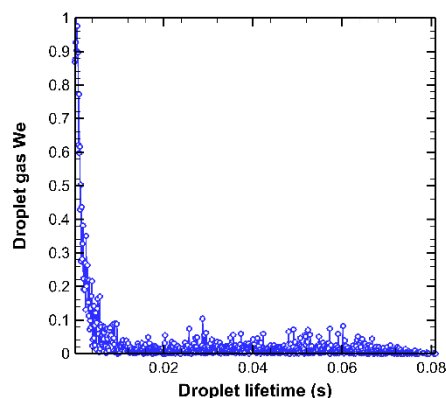
ارایه شده‌اند. به منظور ارزیابی بیشتر حل جریان دو فاز حاضر، توزیع شعاعی SMD و سرعت متوسط قطرات در سه مقطع مختلف دیگر نیز بررسی می‌شود. شکل ۹ نشان می‌دهد که تطابق مناسبی بین پروفیل‌های شبیه‌سازی شده SMD و داده‌های تجربی وجود دارد و متوسط اختلاف بین آن‌ها کمتر از ۶/۸٪ می‌باشد. نزدیک سوخت‌پاش، قطرات کوچکتر در مرکز و قطرات بزرگتر نزدیک به لبه پاشش قرار می‌گیرند. در فواصل دورتر از سوخت‌پاش، اثر فاز پیوسته بر رفتار دینامیکی قطرات افزایش می‌یابد. این باعث می‌شود که توزیع سایز قطرات به سمت یکنواختی پیش رود.



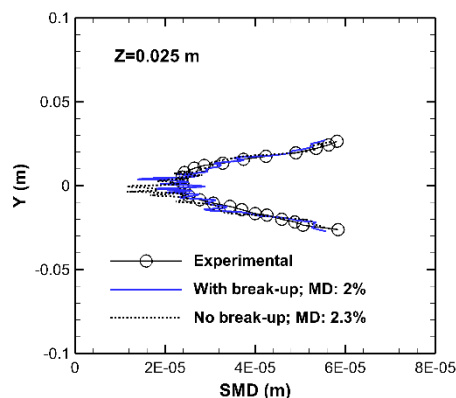
شکل ۹- مقایسه توزیع شعاعی SMD داده‌های تجربی در مقاطع مختلف

شکل ۱۰ پروفیل‌های شعاعی سرعت متوسط محوری قطرات را در شش مقطع مختلف از محفظه را نشان می‌دهد. تطابق قابل قبولی با متوسط اختلاف ۷٪ بین پروفیل‌های حاضر و داده‌های تجربی مشاهده می‌شود. توزیع سرعت متوسط محوری قطرات در جریان دوفاز به صورت متقارن هستند. با کمی فاصله گرفتن از سوخت‌پاش، به دلیل برخورد قطرات با هوا و همچنین شکل‌گیری ناحیه بازگردش، سرعت متوسط محوری کاهش می‌یابد. در فواصل دورتر از نازل سوخت، توزیع سرعت قطرات به توزیع سرعت جریان تک فاز شبیه می‌شود.

قطرات در طول محفظه، جهت اطمینان از این موضوع از مدل شکست آنالوژی تیلور (TAB) جهت شبیه‌سازی شکست قطرات استفاده شده و نتایج آن با حالت بدون در نظر گرفتن شکست ثانویه قطرات مقایسه می‌گردند. همان طور که پیش‌بینی می‌گردد در نظر گرفتن شکست ثانویه قطرات تاثیر ناچیزی بر توزیع سایز و سرعت محوری قطرات دارد.

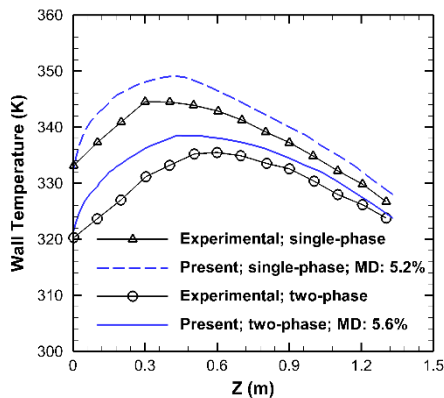


شکل ۷- توزیع عدد وبر گازی قطره در کلاس ماکزیمم سایز قطرات



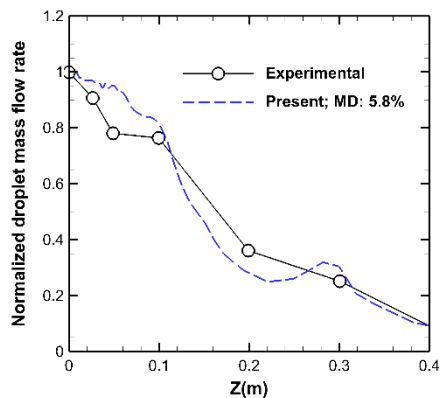
شکل ۸- مقایسه نتایج حاضر با و بدون در نظر گرفتن مدل شکست ثانویه و داده‌های تجربی در مقطع $Z = 0.025 \text{ m}$

با توجه به مطالب بیان شده در بخش‌های قبل، جهت تحلیل و شبیه‌سازی جریان پاشش سوخت مایع درون محفظه تبخیری مدل از مدل $k-\omega$ SST و مدل اتصال دو طرفه بین دو فاز پیوسته و گسسته استفاده شده است. جهت اعتبارسنجی نتایج، پروفیل‌های SMD و سرعت متوسط قطرات، با داده‌های آزمایشگاهی [۸] مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. تا به اکنون، پروفیل‌های SMD و سرعت متوسط قطرات در دو مقطع $Z = 0.025 \text{ m}$ و $Z = 0.1 \text{ m}$ در شکل‌های پیشین

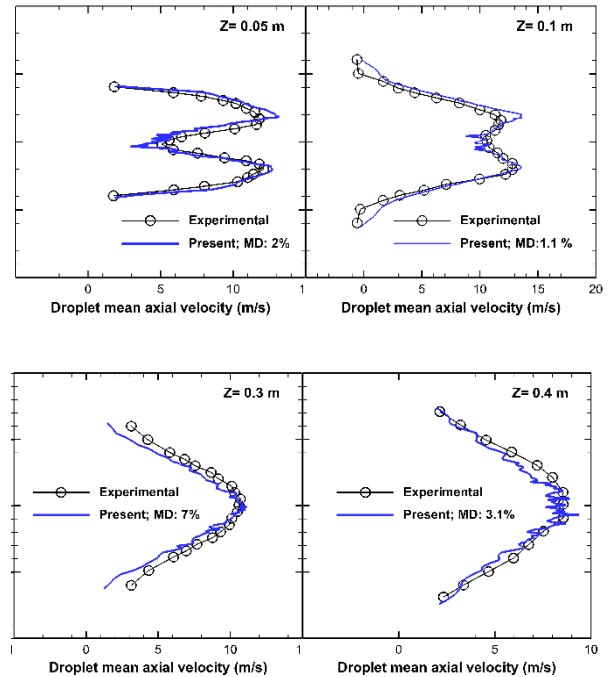


شکل ۱۱- مقایسه پروفیل‌های دمای دیواره حاصل از شبیه‌سازی حاضر و داده‌های تجربی [۸] در دو جریان تک فاز و دو فاز

شکل ۱۲ تغییرات نرخ دبی جرمی نرمالیز شده قطرات سوخت در طول محفظه تبخیری را نشان می‌دهد. یک افت نسبتاً ادامه‌دار هم در پروفیل حاصل از شبیه‌سازی و هم در پروفیل تجربی مشاهده می‌شود. تا فاصله ۴۰۰ میلی‌متری پایین دست سوخت‌پاش، نزدیک به ۹۰٪ قطرات سوخت تبخیر می‌شوند. دبی جرمی تجربی در فاصله بین $50 \text{ mm} < Z < 100 \text{ mm}$ تقریباً ثابت می‌ماند. این پدیده ممکن است مطابق با اظهار سامرفلد [۸]، به دلیل غیر متقارن بودن سوخت‌پاش باشد. نرخ تبخیر بیشتر در محدوده $100 \text{ mm} < Z < 200 \text{ mm}$ جایی که یک افت شدید در نرخ دبی جرمی قطرات وجود دارد، مشاهده می‌شود. هم‌چنین جایی که قطرات در ناحیه بازگردش قرار می‌گیرند و سرعت نسبی بالاتری بین هوای داغ و قطرات وجود دارد، قطرات بیشتری تبخیر می‌شوند.



شکل ۱۲- مقایسه تغییرات نرخ دبی جرمی نرمالیز شده با داده‌های تجربی [۸] بر روی خط مرکزی محفظه



شکل ۱۰- مقایسه توزیع شعاعی مولفه محوری سرعت متوسط قطرات و داده‌های تجربی در مقاطع مختلف

شکل ۱۱ پروفیل‌های دمای دیواره برای هر دو حالت تک فاز (جریان هوای داغ بدون پاشش سوخت) و دو فاز را نشان می‌دهد. از آنجایی که برای گرفتن حرارت و تبخیر قطرات نیاز به گرما می‌باشد، تاثیر تبخیر قطرات بر دمای دیواره واضح است. به دلیل انتقال حرارت از هوای داغ به قطرات، دمای دیواره در جریان دو فاز در مقایسه با جریان تک فاز، به مقدار قابل توجهی کمتر است. جایی که نرخ تبخیر بالاست ($Z < 0.4 \text{ m}$) اختلاف دمای دیواره بین دو جریان تک فاز و دو فاز نزدیک به ۱۵ درجه می‌باشد. با این حال، با پیشروی به سمت پایین دست سوخت‌پاش، این اختلاف به ۵ درجه می‌رسد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق مناسبی با حداکثر اختلاف ۵/۶٪ بین نتایج حاضر و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد. دلیل این اختلاف می‌تواند ناشی از فقدان اطلاعات کافی در خصوص جریان و دمای هوای خنک‌کاری بیرون از محفظه تبخیری مدل و دیگر فرضیات در نظر گرفته شده برای لایه مرزی گرمایی دیواره در شبیه‌سازی حاضر باشد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، به بررسی در نظر گرفتن اثر گرانش، انتقال حرارت تشعشعی و شکست ثانویه بر توزیع قطر و سرعت قطرات، پرداخته شده است. بدین منظور هندسه سامرفلد [۶] شبیه‌سازی شده و با داده‌های تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است. در شبیه‌سازی عددی جریان مغشوش دو فاز، از مدل آشفتگی $k - \omega$ استفاده شده است. پاشش قطرات سوخت مایع و محیط دو فاز قطره و هوا در دیدگاه اویلر- لاگرانژ مدل‌سازی گردیده است. برای مدلسازی انتقال حرارت تشعشعی از مدل جهات مجزا (DOM) و برای شکست ثانویه از مدل TAB استفاده شده است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- ضمن تایید امکان استفاده از عدد وبر بحرانی نزدیک به یک برای پیش‌بینی رخداد شکست ثانویه در جریان پاششی آشفته، مشخص گردید که در جریان غیرواکنشی هندسه حاضر، شکست ثانویه قطرات رخ نمی‌دهد و در نظر گرفتن مدل TAB تاثیری بر توزیع SMD سرعت قطرات ندارد و تنها سبب افزایش هزینه‌های محاسباتی می‌گردد.
- ۲- جهت شبیه‌سازی جریان آشفته دو فاز غیرواکنشی، از بین مدل‌های آشفتگی رهیافت RANS، نتایج حاصل از به کارگیری مدل $k - \omega$ از دقت بالاتری برخوردار است.
- ۳- در جریان غیر واکنشی حاضر، تاثیر انتقال حرارت تشعشعی و انتقال حرارت جابه‌جایی (گرانش) بر توزیع سرعت و قطر قطرات ناچیز است و می‌توان از محاسبات آن‌ها صرف نظر نمود.
- ۴- توزیع سرعت و قطر قطرات شبیه‌سازی شده تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد و حداکثر به ترتیب ۷٪ و ۶/۸٪ است.
- ۵- با فاصله گرفتن از سوخت پاش، توزیع قطر قطرات در راستای شعاع محفظه یکنواخت می‌گردد.
- ۶- به دلیل انتقال حرارت از هوای داغ به قطرات، دمای دیواره در جریان دو فاز در مقایسه با جریان تک فاز، به مقدار قابل توجهی کمتر است. جایی که نرخ تبخیر بالاست ($Z < 0.4 m$) اختلاف دمای دیواره بین دو جریان تک فاز و دو فاز نزدیک به ۱۵ درجه می‌باشد.

با پیش‌روی به سمت پایین دست سوخت‌پاش، این اختلاف به ۵ درجه می‌رسد.
 ۷- جایی که قطرات در ناحیه بازگردش قرار می‌گیرند و سرعت نسبی بالاتری بین هوای داغ و قطرات وجود دارد، قطرات بیشتری تبخیر می‌شوند.

پی‌نوشت‌ها

- ۱ Sauter mean diameter
- ۲ Linear instability sheet atomisation
- ۳ Taylor analogy breakup
- ۴ Large eddy simulation
- ۵ Reynolds-averaged Navier-Stokes
- ۶ Discrete ordinates model

منابع و مراجع

- [1] Su, K., & Zhou, C., "Numerical study of spray parametric effects on gas turbine combustion performance", ASME-PUBLICATIONS-HTD, 364 345-354, 1999.
- [2] Shojaefard, M., Ariafar, K., & Goudarzi, K., "Numerical investigation of flow in the liner of a model reverse-flow gas turbine combustor, proceedings of the institution of mechanical engineers, Part G", Journal of Aerospace Engineering, 223, 1083-1090, 2009.
- [3] No S.-Y., "A review on empirical correlations for jet/spray trajectory of liquid jet in uniform cross flow", International journal of spray and combustion dynamics, 7, 283-313, 2015.
- [4] Bulzan, D. L., "Velocity and drop size measurements in a swirl-stabilized, combusting spray, in: Laser Applications in Combustion and Combustion Diagnostics", International Society for Optics and Photonics, pp. 113-122, 1993.
- [5] Wu, H., Zhang, F., & Zhang, Z., "Fundamental spray characteristics of air-assisted injection system using aviation kerosene", Fuel, 286, 119420, 2021.
- [6] Poozesh, S., Akafuah, N. K., & Campbell, H. R., Bashiri, F., & Saito, K., "Experimental and mathematical tools to predict droplet size and velocity distribution for a two-fluid nozzle", Fluids, 5, 231, 2020.
- [7] Tareq, M. M., Dafsari, R. A., Jung, S., & Lee, J., "Effect of the physical properties of liquid and air on the spray characteristics of a pre-filming airblast nozzle", International Journal of Multiphase Flow, 126, 103240, 2020.
- [8] Sommerfeld, M., & Qiu, H.-H., "Experimental studies of spray evaporation in turbulent flow,

- Kerosene/Air Jet Diffusion Flames, *Energy & Fuels*, 33, 9184-9195, 2019.
- [23] Bazdidi-Tehrani, F., & Abedinejad, M. S., "Influence of incoming air conditions on fuel spray evaporation in an evaporating chamber", *Chemical Engineering Science*, 8, 233-244, 2018.
- [24] Faeth, G., "Evaporation and combustion of sprays", *Progress in Energy and Combustion Science*, 9, 1-76, 1983.
- [25] Sazhin, S. S., "Advanced models of fuel droplet heating and evaporation", *Progress in energy and combustion science*, 32, 162-214, 2006.
- [26] Zeinivand, H., & Bazdidi-Tehrani, F., "Influence of stabilizer jets on combustion characteristics and NOx emission in a jet-stabilized combustor", *Applied Energy*, 92, 348-360, 2012.
- [27] Bazdidi-Tehrani, F., & Zeinivand, H., "Presumed PDF modeling of reactive two-phase flow in a three dimensional jet-stabilized model combustor", *Energy Conversion and Management*, 51, 225-23, 2010.
- [28] Sirignano, W. A., "Fluid dynamics and transport of droplets and sprays", Cambridge University Press, 2010.
- [29] Kollár, L. E., Farzaneh, M., & Karev, A. R., "Modeling droplet collision and coalescence in an icing wind tunnel and the influence of these processes on droplet size distribution", *International Journal of Multiphase Flow*, 31, 69-92, 2005.
- International journal of heat and fluid flow, 19, 10-22, 1998.
- [9] Loth, E., "Numerical approaches for motion of dispersed particles, droplets and bubbles", *Progress in energy and combustion science*, 26, 161-223, 2000.
- [10] Gouesbet, G., & Berlemont, A., "Eulerian and Lagrangian approaches for predicting the behaviour of discrete particles in turbulent flows", *Progress in Energy and Combustion Science*, 25, 133-159, 1999.
- [11] Anand, G., & Jenny, P., "Stochastic modeling of evaporating sprays within a consistent hybrid joint PDF framework", *Journal of computational physics*, 228, 2063-2081, 2009.
- [12] Perini, F., & Reitz, R. D., "Improved atomization, collision and sub-grid scale momentum coupling models for transient vaporizing engine sprays", *International Journal of Multiphase Flow*, 79, 107-123, 2016.
- [13] Hoffmann, S., Holz, S., Koch, R., & Bauer, H.-J., "Euler-Lagrangian simulation of the fuel spray of a planar prefilming airblast atomizer", *CEAS Aeronautical Journal*, 12, 245-259, 2021.
- [14] Beale, J. C., & Reitz, R. D., "Modeling spray atomization with the Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor hybrid model", *Atomization and Sprays*, 9, 1999.
- [15] Alemi, E., & Zargarabadi, M. R., Effects of jet characteristics on NO formation in a jet-stabilized combustor, *International Journal of Thermal Sciences*, 112, 55-67, 2017.
- [16] Bazdidi-Tehrani, F., Mirzaei, S., & Abedinejad, M. S., "Influence of Chemical mechanisms on spray combustion characteristics of turbulent flow in a wall jet can combustor", *Energy & Fuels*, 31, 7523-7539, 2017.
- [17] Bafekr S. H., Shams, M., Ebrahimi, R., & Shadaram A., "Numerical simulation of pressure-swirl spray dispersion by using eulerian-lagrangian method", *Journal of dispersion Science and Technology*, 32, 47-55, 2010.
- [18] Bazdidi-Tehrani F., Abedinejad M. S., & Yazdani-Ahmadabadi, H., Influence of Variable Air Distribution on Pollutants Emission in a Model Wall Jet Can Combustor, *Heat Transfer Research*, 49, 1667-1688, 2018.
- [19] Abou Al-Sood M. M., & Birouk, M., "Droplet heat and mass transfer in a turbulent hot airstream", *International journal of heat and mass transfer*, 51, 1313-1324, 2008.
- [20] Sacomano Filho, F. L., Fukumasu, N. K., & Krieger G. C., "Numerical simulation of an ethanol turbulent spray flame with RANS and diffusion combustion model", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 35, 189-198, 2013.
- [21] Patel N., & Menon S., "Simulation of spray-turbulence-flame interactions in a lean direct injection combustor", *Combustion and Flame*, 153, 228-257, 2008.
- [22] Bazdidi-Tehrani F., Abedinejad M. S., & Mohammadi M., "Analysis of relationship between Entropy Generation and Soot Formation in Turbulent