



## بررسی تأثیر الگوی پاشش اسپری سوخت بر تبخیر قطرات در لوله پیش مخلوط توربین گاز

احمد کاظمی فرد<sup>۱</sup>، حسن خالقی<sup>۱\*</sup> رضا ابراهیمی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

<sup>۲</sup>- دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۲۲

بازنگری: ۱۳۹۷/۰۴/۲۴

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۵/۰۱

### کلمات کلیدی:

لوله پیش مخلوط

تبخیر قطره

فشار بالا

پاشش سوخت

توربین گاز

**خلاصه:** در سیستم احتراق یک توربین گاز سوخت مایع، به دلیل محدودیت طول لوله پیش مخلوط، فرآیند تبخیر قطرات سوخت به طور کامل انجام نمی‌گیرد و قطرات وارد محفظه احتراق می‌شوند. وجود این قطرات در محفظه احتراق باعث می‌گردد که اشتعال در حالت غیر پیش‌مخلوط انجام شود و متعاقب آن میزان نشر اکسیدهای نیتروژن افزایش یابد. برای جلوگیری از نشر این آلاینده‌ها، می‌بایست قطرات اسپری در یک فضای محدود به طور کامل تبخیر گردد. بدین منظور در این جا، یک مکانیزم برای پاشش قطرات سوخت در لوله پیش مخلوط ارائه شده است. در این مکانیزم، قطرات اسپری با الگوی مخروطی توخالی در خلاف جهت جریان هوا تزریق می‌شود. بنابراین در این نوع پاشش، به دلیل افزایش سرعت نسبی قطرات و تسریع در فرآیندهای شکست و تبخیر آنها، دستیابی به این هدف امکان‌پذیر می‌باشد. در بررسی صحت این موضوع، الگوهای مختلفی از پاشش قطرات ان-هیپتان در گاز ازت عبوری از لوله پیش مخلوط با دمای ۸۰۰ کلوین و فشار ۲۰ بار در سیستم اویلری - لاگرانژی شبیه‌سازی شده است. اعتبار مدل‌های توربولانس، انتقال جرم و حرارت و نیز اثر نفوذ مولکول‌های گاز به داخل قطرات سوخت در فشار بالای محیط ارزیابی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با تزریق قطرات اسپری با الگوی اشاره شده، علاوه بر تبخیر کامل قطرات در فضای محدود، توزیع دما و کسر جرمی بخار سوخت در خروجی لوله نیز یکنواخت می‌گردد.

### ۱- مقدمه

در چند دهه‌ی اخیر برای کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن در توربین‌های گازی، استفاده از مکانیزم پیش مخلوط رقیق<sup>۱</sup> سوخت و هوا در حال گسترش می‌باشد. در این مکانیزم با مخلوط کردن سوخت و هوا با نسبت‌های هم‌ارزی کمتر از یک، ماکزیمم دما و نشر اکسیدهای نیتروژن کاهش می‌یابد. زمانی که از سوخت‌های مایع استفاده می‌شود، پیش مخلوط قطرات سوخت و هوا کمک‌چندانی در کاهش مقدار اکسیدهای نیتروژن نمی‌کند. در احتراق این پیش مخلوط جزئی، اگرچه با ریز شدن اندازه قطرات و در نتیجه یکنواخت‌تر شدن مخلوط سوخت و هوا، مقدار اکسیدهای نیتروژن کاهش می‌یابد [۱]، ولی به دلیل وجود قطرات و انجام فرآیند احتراق در شرایط نزدیک به استوکیومتری، دمای موضعی از ۱۷۰۰ کلوین افزایش یافته، سبب نشر اکسیدهای نیتروژن می‌گردد [۲ و ۳]. بنابراین ضروری است که قطرات اسپری، قبل از ورود به محفظه احتراق، به طور کامل تبخیر و

مخلوط گردد. لذا استفاده از این روش، که به مکانیزم پیش تبخیر و پیش مخلوط رقیق<sup>۲</sup> معروف است، می‌تواند به عنوان راه حل اساسی در کاهش این آلاینده‌ها در توربین‌های گازی سوخت مایع مطرح باشد. با توجه به محدودیت‌ها، لوله پیش مخلوط می‌بایست به گونه‌ای طراحی گردد تا علاوه بر تبخیر کامل قطرات و اختلاط با هوا، طول آن نیز کوچک باشد. برای رسیدن به این هدف، تحقیقات زیادی با الگوهای مختلف پاشش قطرات در لوله پیش مخلوط انجام شده است [۴-۱۰]. گو<sup>۳</sup> و همکاران [۴-۶] با مدل‌سازی اسپری سوخت در لوله پیش مخلوط، پخش و تبخیر قطرات را در شرایط محیطی با فشار یک اتمسفر را بررسی کردند. در حالت تزریق قطرات در راستای جریان، نتایج آن‌ها نشان داد که با انتخاب زاویه پاشش اسپری و سرعت تزریق قطرات به ترتیب ۱۲۹ درجه و ۵ متر بر ثانیه، میزان پراکندگی و تبخیر قطرات بهبود می‌یابد [۴] و در حالت تزریق قطرات در جهت عمود بر جریان، زاویه بهینه پاشش ۱۰۰ درجه می‌باشد [۵]. با این

2 Lean Premixed Prevaporized (LPP)

3 Gu

1 Lean Premixed (LP)

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: khaleghi@modares.ac.ir



وجود، آن‌ها تأثیر فشار بالای گاز در لوله پیش مخلوط بر شکست و تبخیر قطرات را در نظر نگرفته‌اند. زنگ<sup>۱</sup> و همکاران [۱۱] به طور تجربی، تأثیر راستای محور انژکتور نسبت به محور لوله بر میزان پراکندگی قطرات اسپری با الگوی مخروط توخالی را بررسی کردند. بر پایه این تحقیقات، زمانی که پاشش قطرات در خلاف جریان گاز و با زاویه ۶۰ درجه بین این محورها باشد، میزان پراکندگی قطرات در میدان جریان افزایش می‌یابد. همچنین نتایج تحقیقات سینها<sup>۲</sup> و همکاران [۱۲] نشان داد که قطرات تزریق شده عمود بر جریان گاز، با توجه به اندازه قطرشان، از یکدیگر جدا می‌شوند. قطرات بزرگتر به خاطر داشتن نسبت نیروی مومنتم به نیروی درگ<sup>۳</sup> بیشتر، در عمق بیشتری در جریان نفوذ می‌کند؛ در صورتی که قطرات کوچکتر در ارتفاع کمتری پرتاب می‌شود و سریع‌تر با جریان گاز هم‌مسیر می‌شود. قابل ذکر است که در این مطالعات، برای حالت پاشش قطرات اسپری عمود بر جریان گاز، تزریق از نقطه‌ای روی دیواره انجام شده است و قطرات اسپری به طور نامتقارن در جریان گاز توزیع می‌گردد. بنابراین انتظار می‌رود که برای اختلاط و تبخیر کامل قطرات، به لوله بلندتری نیاز باشد. هرچند که برای داشتن یک مخلوط یکنواخت‌تر در خروجی لوله، استفاده از دو یا چند انژکتور با این نوع پاشش گزارش شده است [۱۳ و ۱۴]. برای حالت تزریق قطرات در جهت جریان نیز، به دلیل کاهش سرعت قطرات نسبت به گاز اطراف و وابستگی فرآیندهای شکست و تبخیر قطرات با این سرعت نسبی، امکان تبخیر کامل قطرات در یک لوله کوتاه فراهم نمی‌باشد. بنابراین از یک طرف برای دستیابی به بیشترین سرعت نسبی قطرات، لازم است که پاشش در خلاف جهت جریان صورت گیرد. از طرف دیگر به منظور استفاده بیشتر از تمام فضای داخل لوله، لازم است که تزریق از نقطه‌ای روی محور لوله و به صورت متقارن انجام شود. بنابراین در این مطالعه سعی شده است که این نوع پاشش قطرات سوخت در لوله پیش مخلوط بررسی گردد و همچنین از آن-هپتان، به دلیل عدد ستان<sup>۴</sup> آن، به عنوان یک مرجع برای سوخت دیزل انتخاب شده است.

## ۲-۱- معادلات فاز گاز

معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی و گونه‌ها برای فاز گاز را می‌توان به ترتیب زیر نوشت [۱۸]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot \{2(\mu + \mu_t) [\mathbf{S} - \frac{1}{3}(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I}] - \frac{2}{3}\rho k \mathbf{I}\} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{S}_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} h) = \frac{DP}{Dt} + \nabla \cdot [(\alpha + \alpha_t)\nabla h] + S_h \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y_i) = \nabla \cdot [(\mu + \mu_t)\nabla Y_i] + S_{Y_i} \quad (4)$$

در این رابطه  $Y_i$  و  $h$ ،  $\mathbf{u}$ ،  $\rho$  به ترتیب جرم حجمی، بردار سرعت،

جریان دو فازی است که شامل فرآیندهای گرم و تبخیر قطرات و نیز اختلاط بخار حاصل با گاز ورودی می‌باشد. در مدل‌سازی این نوع جریان، اثر بر هم کنش این دو فاز بسیار مهم است. در چند دهه اخیر، به جهت کاهش حجم محاسبات، دیدگاه اوپلری - لاگرانژی معرفی شده است [۱۵]. یکی از مهمترین روش‌ها در این دیدگاه، مدل قطرات مجزا<sup>۵</sup> است [۱۶] که در آن فاز گاز در سیستم اوپلری و فاز مایع در سیستم لاگرانژی به صورت محدود بسته‌هایی از قطرات یکسان به نام پارسل در نظر گرفته می‌شود. هر پارسل شامل قطراتی است که از نظر قطر، سرعت، موقعیت، درجه حرارت و زمان سپری شده پس از تزریق، برابر می‌باشد. مشخصات هر بسته از قطرات تا زمانی که تبخیر نشده است به وسیله معادلات لاگرانژی محاسبه می‌گردد. در این مدل، اثرات متقابل دو فاز از طریق افزودن جملات چشمه در معادلات بقای فاز گاز و مایع لحاظ شده، نرخ تبادل بین فازها از طریق روابط تجربی محاسبه می‌شود. در این تحقیق به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد و دقت بالای مدل قطرات مجزا، از این مدل در شبیه‌سازی جریان دو فازی استفاده شده است [۱۷]. بنابراین در این بخش، معادلات حاکم برای هر دو فاز قطرات و گاز ارائه شده، سپس مدل‌های به کار گرفته شده در محاسبات به طور مختصر تشریح شده است. همچنین به منظور در نظر گرفتن اثر نفوذ مولکول‌های گاز به داخل قطرات سوخت در فشارهای محیطی بالا، جزئیات محاسبات آورده شده است.

## ۲- معادلات حاکم

جریان گاز در لوله پیش مخلوط همراه با قطرات تزریق شده، یک

- 1 Zhang
- 2 Sinha
- 3 Drag
- 4 Cetane number

$$f_{\mu} = \exp\left[\frac{-3.4}{(1 + R_t/50)^2}\right]$$

$$f_1 = 1$$

$$f_2 = 1 - 0.3 \exp(-R_t^2), \quad R_t = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}$$

$$\sigma_k = 1$$

$$\sigma_{\varepsilon} = 1.3$$

$$c_{\mu} = 0.09$$

$$c_1 = 1.44$$

$$c_2 = 1.92$$

$$c_3 = -0.33$$

## ۲-۲- معادلات فاز قطرات

معادله مومنتوم حاکم بر حرکت یک قطره مطابق قانون دوم نیوتن

به دست می‌آید. با لحاظ کردن نیروهای درگ و گرانش وارد بر قطره و نیز به دلیل کوچک بودن نسبت جرم حجمی هوا به جرم حجمی قطره و با صرف نظر کردن از نیروهای جرم مجازی، باست<sup>۲</sup> و ساافمن<sup>۳</sup> [۱۹]، این معادله به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{d\mathbf{u}_d}{dt} = \frac{\mathbf{u} - \mathbf{u}_d}{\tau_u} + \mathbf{g} \quad (۱۱)$$

که  $\mathbf{u}$  بردار سرعت گاز،  $\mathbf{u}_d$  بردار سرعت قطره و  $\tau_u$  زمان سکونت مومنتم مطابق زیر تعریف می‌گردد:

$$\tau_u = \frac{4}{3} \frac{d\rho_d}{\rho c_d |\mathbf{u} - \mathbf{u}_d|} \quad (۱۲)$$

ضریب درگ  $C_d$  نیز بر حسب عدد رینولدز  $Re_d = \frac{\rho d |\mathbf{u} - \mathbf{u}_d|}{\mu_g}$  از رابطه ذیل قابل محاسبه می‌باشد.

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re_d} \left(1 + 0.15 Re_d^{\frac{2}{3}}\right) & ; Re_d < 1000 \\ 0.424 & ; Re_d \geq 1000 \end{cases} \quad (۱۳)$$

موقعیت قطرات ( $\mathbf{r}_d$ ) نیز با استفاده از معادله سینماتیک زیر به دست خواهد آمد.

$$\mathbf{u}_d = \frac{d\mathbf{r}_d}{dt} \quad (۱۴)$$

نرخ تبخیر قطرات با استفاده از مدل گرادیان پخش<sup>۴</sup>، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{m}_d = -2\pi\rho d D_{diff} (Y_s - Y_{\infty}) Sh \quad (۱۵)$$

آنتالپی ترموشیمیایی و کسر جرمی گونه  $i$  می‌باشد. همچنین  $P$  فشار،  $S$  کرنش برشی،  $g$  شتاب گرانش،  $\mu$  لزجت دینامیکی،  $\alpha$  ضریب پخش حرارتی و  $\mathbf{I}$  ماتریس واحد است. جملات  $S_{Y_i}$ ،  $S_h$ ،  $S_u$ ،  $S_m$  نیز به ترتیب مولد جرم، مومنتوم، انرژی و گونه  $i$  ناشی از تبادل فاز مایع با فاز گاز می‌باشد که به صورت زیر تعیین می‌شود [۱۹-۲۲]:

$$S_m = -\frac{1}{\Delta V} \sum_{N_P} \dot{m}_d \quad (۵)$$

$$S_u = -\frac{1}{\Delta V} \sum_{N_P} [m_d \left(\frac{\mathbf{u} - \mathbf{u}_d}{\tau_u}\right) + \dot{m}_d \mathbf{u}_d] \quad (۶)$$

$$S_h = -\frac{1}{\Delta V} \sum_{N_P} [m_d \left(\frac{\mathbf{u} - \mathbf{u}_d}{\tau_u} + \mathbf{g}\right) \cdot \mathbf{u}_d + \dot{m}_d \left(\frac{1}{2} \mathbf{u}_d \cdot \mathbf{u}_d + h_v\right) + \dot{q}_d] \quad (۷)$$

$$S_{Y_i} = -\frac{1}{\Delta V} \sum_{N_P} \dot{m}_d \quad (۸)$$

در این روابط،  $\Delta V$  حجم سلول محاسباتی مورد نظر و  $h_v$  آنتالپی بخار سوخت می‌باشد. همچنین  $\dot{q}_d$  نرخ انتقال حرارت منتقل شده از فاز گاز به قطره است که نحوه محاسبه آن در بخش بعدی ارائه شده است.

به توجه به نتایج تحقیقات گرجی<sup>۱</sup> [۲۳]، از میان مدل‌های مختلف  $k$ - $\varepsilon$ ، مدل لاندر - شارما برای مدل‌سازی جریان توربولانس داخل لوله انتخاب گردید. معادلات این مدل به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \rho G - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{u} - \rho \varepsilon - 2\mu |\nabla \sqrt{k}|^2 \quad (۹)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \nabla \varepsilon \right) + c_1 f_1 \rho G \frac{\varepsilon}{k} - \left( \frac{2}{3} c_1 + c_3 \right) \rho \varepsilon \nabla \cdot \mathbf{u} - c_2 f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + 2\mu \mu_t \frac{|\Delta \mathbf{u}|^2}{\rho} \quad (۱۰)$$

در این روابط  $k$  انرژی جنبشی توربولانس،  $\varepsilon$  تلفات انرژی توربولانس و  $G$  جمله تولید انرژی جنبشی توربولانس می‌باشد. همچنین لزجت توربولانس از رابطه  $\mu_t = c_{\mu} f_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$  بدست می‌آید. مقادیر دیگر ضرایب به شرح زیر می‌باشد:

2 Basset  
3 Saffman  
4 Gradient diffusion model

### ۲-۳- مدل‌های انتخاب شده در فرآیند اسپری

زمانی که پاشش سوخت در یک محیط گازی با فشار بالا صورت می‌گیرد ناحیه متراکم سوخت جلوی انژکتور بسیار کوچک می‌باشد و لحاظ نکردن این ناحیه منطقی به نظر می‌رسد و توزیع قطر اولیه قطرات پس از این ناحیه بر مبنای توابع تحلیلی توزیع چگالی احتمال انجام می‌گیرد [۲۶]. یکی از مهم‌ترین این توزیع‌ها، توزیع روزن - رامرل<sup>۱</sup> است که با توزیع قطرات خروجی از انژکتور توربین‌های گازی نزدیک‌تر می‌باشد [۲۷]. تابع این توزیع به صورت زیر است:

$$1 - Q = \exp\left[-\left(\frac{d}{X}\right)^q\right] \quad (22)$$

در این رابطه،  $Q$  نسبت حجم قطرات با قطر کمتر از  $d$  به حجم کل قطرات می‌باشد.  $X$  و  $q$  نیز ثابت‌هایی هستند که به روش تجربی به دست می‌آید.

عوامل مختلفی بر ساختار اسپری مؤثر است که از آن جمله می‌توان به شکست قطرات و برخورد قطرات با یکدیگر اشاره نمود. قطرات با برخورد به گاز پیرامونی و ایجاد ناپایداری روی سطوح به قطرات ریزتری تقسیم می‌شوند. در این تحقیق از میان تمام مدل‌های مختلف شکست قطرات، مدل بهبود یافته رایلی تیلور - کلون هلمهولتز<sup>۲</sup> استفاده شده است [۲۸]. این مدل در شرایط محیطی دما و فشار بالای گاز، ساختار اسپری را بهتر پیشگویی می‌کند [۲۹] و [۳۰]. همچنین استفاده از مدل برخورد قطرات، باعث پیشگویی بهتر مشخصات کلی اسپری می‌شود [۴] و [۳۱]. در سال ۱۹۸۱ میلادی، ارورکه<sup>۳</sup> مدلی ارائه کرد که اثر برخورد قطرات در محاسبات را لحاظ می‌کرد. از معایب این مدل، محاسبه اثر برخورد قطرات موجود در هر سلول محاسباتی است که موجب می‌شود این مدل به اندازه سلول‌های شبکه وابسته باشد. مطابق این مدل، با کوچک شدن سلول‌های محاسباتی، از یک طرف احتمال برخورد پارسل‌ها در یک سلول افزایش می‌یابد و از طرف دیگر پارسل‌های اطراف آن سلول در مدل‌سازی برخورد قطرات با یکدیگر حذف می‌شوند. در سال ۲۰۰۱ نوردین [۳۲] مدل برخورد قطرات ارورکه را با توجه به راستای حرکت قطرات و نیز زمان تلاقی آن‌ها بهبود داد که در این جا این مدل بهبود

در این رابطه،  $Y_s$  و  $Y_\infty$  به ترتیب کسر جرمی سوخت روی سطح قطره و در بی‌نهایت است و عدد شروود به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۲۴].

$$Sh = 2 + 0.6Re_d^{1/2}Sc^{1/3} \quad (16)$$

که  $Sc$  عدد اشمیت است. همچنین تغییرات دمای یک قطره در حال تبخیر با زمان از موازنه انتقال حرارت هدایتی و سرمایش تبخیری قطره با گاز پیرامون به دست می‌آید. با فرض نامحدود بودن ضریب هدایت حرارتی قطره، دمای قطره در هر لحظه یکنواخت خواهد بود و معادله انرژی برای این قطره به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{T - T_d}{\tau_h} f - \frac{h_{fg}}{c_{p,d}\tau_e} \quad (17)$$

که در آن ضریب  $f = \frac{z}{e^z - 1}$ ، مقدار انتقال حرارت ورودی به یک قطره با قطر ثابت را نسبت به یک قطره در حال تبخیر تصحیح می‌کند [۲۵]. در این رابطه، زمان سکونت انتقال حرارت  $\tau_h$  و زمان سکونت تبخیر  $\tau_e$  به صورت زیر است

$$\tau_h = \frac{m_d c_{p,d}}{\pi d k_f Nu} \quad (18)$$

$$\tau_e = \frac{m_d}{\pi \rho d D_{diff} \ln(1+B) Sh} \quad (19)$$

که  $B = \frac{Y_s - Y_\infty}{1 - Y_s}$  ضریب انتقال جرم اسپالدینگ می‌باشد. همچنین عدد ناسلت روی سطح قطره به صورت زیر [۲۴]

$$Nu_d = 2 + 0.6Re_d^{1/2}Pr^{1/3} \quad (20)$$

و عدد پرانتل به صورت  $Pr = \frac{\mu C_p}{k_\infty}$  تعریف می‌شود که  $k_\infty$  ضریب هدایت حرارتی توده گاز است.

همچنین مقدار نرخ انتقال حرارت  $\dot{q}_d$  منتقل شده از فاز گاز به قطره از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{q}_d = \frac{m_d c_{p,d}(T - T_d) f}{\tau_h} \quad (21)$$

1 Rosin-Rammler

2 Rayleigh Taylor - Kelvin Helmholtz

3 O'Rourke

یافته به کار گرفته شده است.

سوخت در شرایط محیطی فشار بالا با دقت خوبی مدل‌سازی کنند. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش فشار گاز محیط، اختلاف نتایج محاسبات حاصل از قانون رانول با نتایج تجربی به شدت افزایش می‌یابد، حال آن که با در نظر گرفتن اثر نفوذ مولکول‌های گاز به داخل قطرات سوخت، می‌توان این اختلاف را کاهش داد.

با توجه به نتایج تحقیقات فوق، معادله حالت پینگ - رابینسون برای محاسبه پارامترهای مورد نیاز در مدل‌سازی تبخیر قطرات سوخت ان-هپتان انتخاب گردید. برای دستیابی به این هدف، ابتدا می‌بایست مدل تعادلی مایع - بخار چند جزئی گونه‌ها را به دست آورد. به طور کلی چهار روش مختلف برای تهیه منحنی‌های تعادل فاز مایع - بخار وجود دارد [۳۶]. با توجه به ثابت بودن فشار محیطی لوله پیش مخلوط، روش نقطه حباب<sup>۶</sup> برای محاسبه منحنی‌های تعادل در نظر گرفته شد. در این روش با فرض داشتن کسر مولی مایع سوخت، پارامترهای دیگر منحنی تعادل، یعنی کسر مولی بخار سوخت و دمای تعادل به صورت زیر به دست می‌آید.

معادله حالت پینگ - رابینسون برای مخلوط چند جزئی گونه‌ها

برابر است با:

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a_{mix}}{v^2+2bv-b^2} \quad (24)$$

در این رابطه ضرایب  $a$  و  $b$  برای فاز گازی مخلوط از معادلات زیر به دست می‌آید [۳۶]:

$$a = \sum \sum y_i y_j a_{ij} \quad (25)$$

$$b = \sum y_i b_i \quad (26)$$

که  $y_i$  کسر مولی بخار جزء  $i$  است. با داشتن ضریب عکس العمل دو گانه  $k_{ij}$  از این دو جزء، مقدار ضریب  $a_{ij}$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$a_{ij} = \sqrt{a_i a_j} (1 - k_{ij}) \quad (27)$$

همچنین با داشتن دما، فشار بحرانی و ضریب خارج از مرکز  $\omega_i$  مربوط به جزء  $i$ ، ضریب  $a_i$  به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$a_i = \frac{0.45724R^2 T_{C,i}^2}{P_{C,i}} \left[ 1 + f(\omega_i) (1 - \sqrt{T/T_{C,i}}) \right]^2 \quad (28)$$

6 Bubble point

## ۲-۴- تعادل ترمودینامیکی بین فازهای مایع و گاز در فشارهای بالا

در مدل‌سازی تبخیر قطرات هیدروکربن در فشارهای محیطی پایین، کسر مولی جزء بخار سوخت در نزدیکی سطح قطره، با استفاده از قانون رانول، مطابق رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$C_{i,s} = \frac{P_{sat}(T_d)}{RT_d} \quad (23)$$

در این رابطه،  $T_d$  دمای قطره و  $P_{sat}(T_d)$  فشار اشباع بخار سوخت در این دما می‌باشد. استفاده از این قانون زمانی قابل قبول است که فشار گاز محیط حدود یک بار و یا کمتر باشد. با افزایش فشار گاز محیط، نفوذ مولکول‌های گاز پیرامون به داخل قطره افزایش می‌یابد، به طوری که فرض خالص بودن بخار سوخت روی سطح قطره دیگر صحیح نمی‌باشد و لازم است مقدار کسر مولی بخار سوخت در این ناحیه به طور دقیق محاسبه گردد.

از اوایل قرن اخیر، مدل‌سازی تبخیر یک قطره هیدروکربن با لحاظ کردن اثر نفوذ مولکول‌های گاز به داخل قطره، بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. این نوع مدل‌سازی با فرض تعادل ترمودینامیکی بین گونه‌ها روی سطح قطره انجام شده، در مقالات از آن با عنوان مدل فشار بالا نام برده شده است. زو<sup>۱</sup> و آگاروال [۳۳] در سال ۲۰۰۲ برای محاسبه کسر مولی بخار سوخت روی سطح یک قطره ان-هپتان در محیط گازی نیتروژن فشار بالا، از معادلات حالت مختلف ردلیش - کوانگ<sup>۲</sup>، سوآو - ردلیش - کوانگ<sup>۳</sup> و پینگ - رابینسون<sup>۴</sup> استفاده کردند و نتایج حاصل از تبخیر قطره را با یکدیگر مقایسه نمودند. نتایج تحقیقاتشان نشان می‌دهد که شدت تبخیر به دست آمده از معادله اول نسبت به دو معادله دیگر دارای بیشترین خطاست. آن‌ها علت آن را پیشگویی کمتر دمای بحرانی و آنتالپی تبخیر مخلوط نسبت به نتایج تجربی بیان کردند. ژنگ و کونگ [۳۴] در سال ۲۰۱۱ و نیز لانگ<sup>۵</sup> و همکاران [۳۵] در سال ۲۰۱۵ با استفاده از معادله حالت پینگ - رابینسون توانستند فرآیند تبخیر قطرات

1 Zhu  
2 Redlich-Kwong  
3 Soave-Redlich-Kwong  
4 Peng-Robinson  
5 Long

$$\bar{H}_i = H_i^o - RT^2 \left( \frac{\partial \ln \hat{\phi}_i}{\partial T} \right)_{P, x_i} \quad (37)$$

که  $H_i^o$  آنتالپی گاز ایده‌آل جزء  $i$  است.

### ۳- روش حل عددی

در این تحقیق معادلات حاکم با استفاده از کد اسپری فوم از مجموعه کدهای متن باز<sup>۱</sup> اوپن فوم همراه با تغییراتی در زیر مدل‌های آن حل شده است. کد اسپری فوم در سیستم اویلری - لاگرانژی نوشته شده است. با در نظر گرفتن جملات کوپل دو سویه، این کد قادر است که جریان دو فازی حاصل از اسپری سوخت در یک محیط توربولانس را شبیه سازی کند. در سیستم اویلری، فرم معادلات ناویر - استوکس به صورت سه بعدی و ناپایا است. گسسته سازی معادلات به روش حجم محدود<sup>۲</sup> با المان‌های چند وجهی بی سازمان و با استفاده از شبکه هم‌مکان<sup>۳</sup> انجام شده است [۳۷-۳۹]. در تبدیل معادلات حاکم به معادلات جبری، جملات زمانی به روش اویلری، جملات جابه‌جایی به روش ترکیبی بالادست و تفاضل مرکزی و جملات پخش به روش تفاضل مرکزی گسسته سازی شده است. کوپل شدن سرعت و فشار در معادلات بقای جرم و مومنتم، با استفاده از الگوریتم پیروز<sup>۴</sup> انجام شده است. همچنین معیار همگرایی برای تمام معادلات،  $10^{-6}$  در نظر گرفته شده است. در سیستم لاگرانژی، حل معادلات به روش تحلیلی و تصحیح ضرایب با استفاده از تکرار محاسبات صورت گرفته است. با توجه به وجود مدل رانول در کد موجود اسپری فوم، مدل فشار بالای اشاره شده در بخش قبل، جایگزین این مدل گردید و از آن در حل معادلات حاکم استفاده شده است.

با توجه به مدل سازی تزریق قطرات سوخت در گاز عبوری از لوله پیش مخلوط، هندسه مورد نظر یک لوله به قطر ۱۸ میلی‌متر و طول ۴۴ میلی‌متر انتخاب گردید. شرایط مرزی ورودی به لوله، سرعت و دما ثابت، خروجی از لوله، فشار ثابت و روی دیواره، دما ثابت در نظر گرفته شده است. ترسیم هندسه و شبکه بندی آن در مجموعه اوپن فوم انجام شده است. به منظور کاهش خطای محاسبات، هندسه مورد نظر با استفاده از سلول‌های سازمان یافته شش وجهی از نوع O شبکه بندی شده است. به منظور پیشگویی دقیق پروفیل سرعت

$$f(\omega_i) = 0.37464 + 1.54226\omega_i - 0.26992\omega_i^2 \quad (29)$$

$$b_i = \frac{0.0778RT_{C,i}}{P_{C,i}} \quad (30)$$

که  $T_{C,i}$  و  $P_{C,i}$  به ترتیب دما و فشار بحرانی جزء  $i$  است. با حذف پارامتر  $v$  بین معادله (۲۲) و معادله کلی حالت  $Pv = ZRT$ ، معادله جبری ضریب تراکم پذیری  $Z$  با درجه سه به شکل زیر به دست می‌آید:

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - 2B - 3B^2)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0 \quad (31)$$

در این رابطه ضرایب  $A$  و  $B$  به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$A = a \frac{P}{(RT)^2} \quad (32)$$

$$B = b \frac{P}{RT} \quad (33)$$

با محاسبه ضریب تراکم پذیری  $Z$  می‌توان ضریب فوگاسیته جزء  $i$  را به صورت زیر محاسبه کرد [۳۶]:

$$\hat{\phi}_i = \exp \left\{ \frac{\frac{B_i}{B}(Z-1) - \ln(Z-B) + \frac{A}{2\sqrt{2}B} \left[ \frac{B_i}{B} - \frac{2}{a} \sum y_k a_{ik} \right] \ln \left[ \frac{Z+(1+\sqrt{2})B}{Z+(1-\sqrt{2})B} \right]}{1} \right\} \quad (34)$$

به همین ترتیب می‌توان محاسبات مربوط به فاز مایع را نیز تکرار نمود. با برابر بودن فوگاسیته فاز بخار و مایع جزء  $i$ ، به راحتی می‌توان کسر مولی بخار جزء  $i$  مطابق رابطه زیر به دست آورد:

$$y_i = \frac{x_i \hat{\phi}_i^l}{\hat{\phi}_i^v} \quad (35)$$

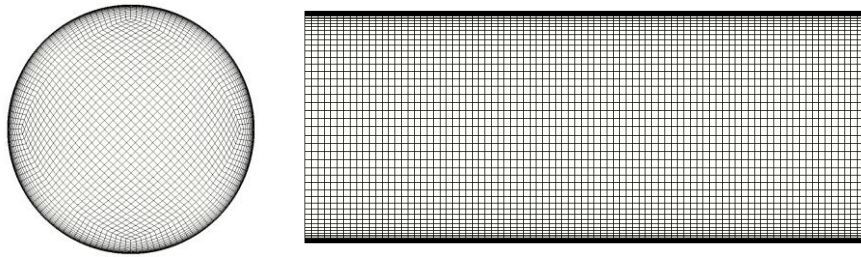
در این رابطه  $\hat{\phi}_i^l$ ،  $\hat{\phi}_i^v$  و  $x_i$  به ترتیب ضریب فوگاسیته فاز بخار و مایع و کسر مولی فاز مایع جزء  $i$  است.

گرمای نهان تبخیر قطره نیز از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$h_{fg} = \sum_i x_i (\bar{H}_{v,i} - \bar{H}_{l,i}) \quad (36)$$

مقدار آنتالپی جزئی هر فاز از گونه  $i$ ،  $\bar{H}_i$ ، را می‌توان از معادله ترمودینامیکی زیر به دست آورد [۳۶]:

1 Open Source  
2 Finite Volume  
3 Collocated  
4 Pressure Implicit Split Operator (PISO)



شکل ۱- نمای برش عرضی و طولی لوله شبکه بندی شده  
Fig. 1. Transverse and longitudinal cross-sectional view

انداختن تزریق قطرات سوخت، جریان دائمی داخل لوله به دست آمد. نتایج این مدل سازی در شکل ۲ ارائه و با داده های تجربی مقایسه شده است. قابل توجه است که در چنین شبکه درشتی، ماکزیمم خطای سرعت حدود ۶ درصد می باشد. در ادامه خواهیم دید که با کوچک تر کردن اندازه سلول های شبکه، این خطا نیز کاهش می یابد. با توجه به ثابت بودن فشار در لوله پیش مخلوط و فرض تعادل ترمودینامیکی بین دو جزء آن-هیپتان و نیتروژن روی سطح قطرات سوخت، پارامترهای کسر مولی بخار سوخت، آنتالپی تبخیر و ضریب تراکم پذیری (مورد نیاز در محاسبات فرآیند انتقال جرم و حرارت بین قطره و گاز)، فقط تابعی از دمای سطح قطره است که با حل معادلات

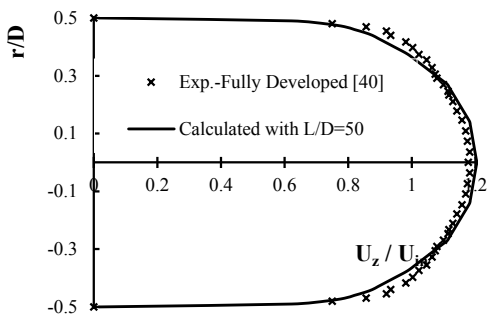
در داخل لوله پیش مخلوط، سلول های نزدیک به دیواره بسیار ریز در نظر گرفته شده است. شکل ۱ نمایی از شبکه بندی هندسه مذکور با ۲۸۱۶۰۰ سلول را نمایش می دهد.

#### ۴- نتایج مدل سازی

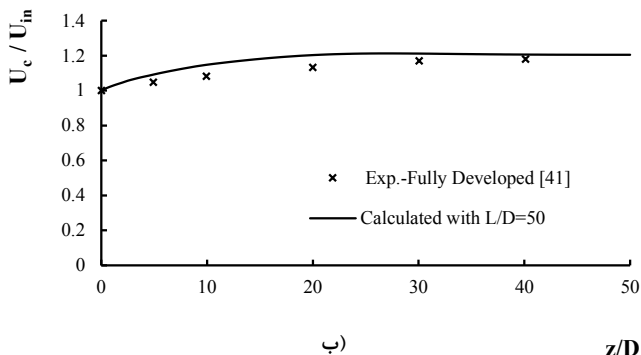
##### ۴-۱- اعتبار سنجی نتایج

به منظور صحت سنجی نتایج به دست آمده در این تحقیق، داده تجربی یا عددی مناسبی برای مقایسه نتایج وجود ندارد. در عین حال به دلیل وجود برخی داده ها در شرایط نزدیک به مساله، اعتبار مدل های به کار گرفته شده در محاسبات جریان توربولانس، نفوذ گاز در قطرات و انتقال جرم و حرارت بین دو فاز بررسی شده است. همچنین در صحت سنجی مدل های نیروی درگ، شکست و برخورد قطرات انتخاب شده در محاسبات، به نتایج تحقیقات مراجع [۲۹ و ۳۰] بسنده شده است. در این مراجع، با به کارگیری مدل ها و روش های حل اشاره شده در بخش های ۲ و ۳، طول نفوذ اسپری در فشار یک اتمسفر پیشگویی شده و با داده تجربی مقایسه گردیده است. لذا با توجه به دقت مناسب نتایج، در این جا از تکرار این محاسبات خودداری شده است.

در اعتبارسنجی جریان توربولانس در داخل لوله، از داده تجربی ریچ و بیر<sup>۱</sup> [۴۰] برای پروفیل سرعت در خروجی لوله و از داده تجربی وارد-اسمیت<sup>۲</sup> [۴۱] برای توزیع سرعت روی خط تقارن لوله با رینولدز ورودی ۵۰۰۰۰ استفاده شده است. با توجه به این که این داده ها مربوط به جریان توسعه یافته است، در مدل سازی جریان، طول لوله ۹۰۰ میلی متر و قطر آن ۱۸ میلی متر در نظر گرفته شده است. همچنین به دلیل حجم بالای محاسبات، بجز نزدیک دیواره، این لوله با سلول های ۲ میلی متری شبکه بندی شده است. سپس با به تأخیر



الف)



ب)

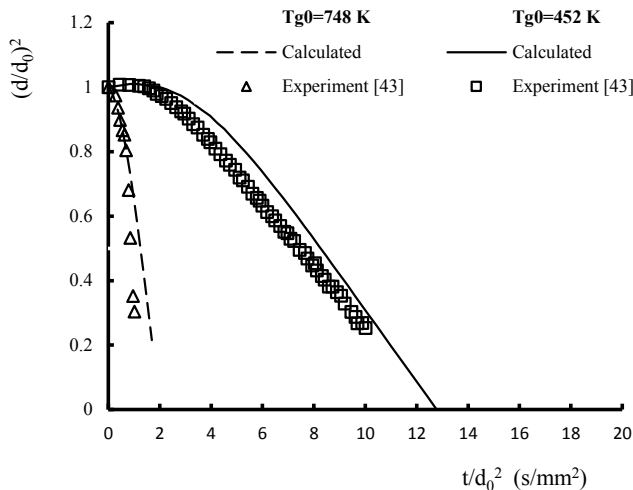
z/D

شکل ۲. جریان توسعه یافته داخل لوله با رینولدز ورودی ۵۰۰۰۰ الف- پروفیل سرعت در خروجی لوله ب- توزیع سرعت روی خط تقارن لوله

Fig. 2. Fully developed flow in the pipe with  $Re=50000$  a) Outlet velocity profile b) Velocity distribution on the centerline

1 Reich & Beer

2 Ward-Smith



شکل ۴. مقایسه منحنی‌های تبخیر یک قطره ساکن با نتایج تجربی در فشار محیطی ۲۰ بار

Fig. 4. Comparison between the simulation and experimental data for the evaporation of a stationary droplet at ambient pressure 20 bar

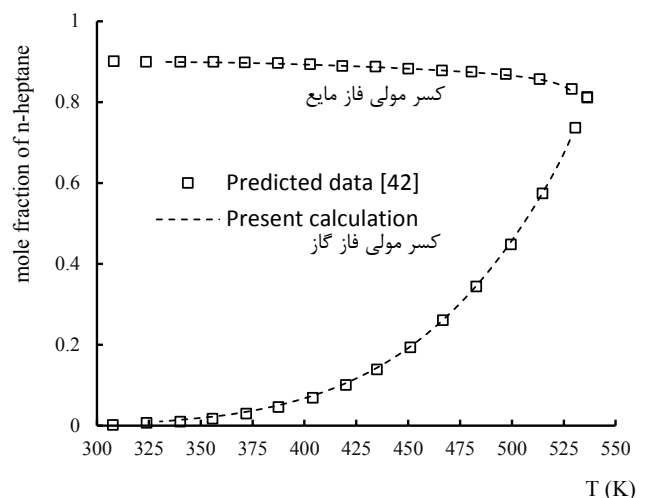
قطره بزرگ جستجو کرد. در عین حال، پیش‌بینی می‌شود که با کاهش قطر قطره، این خطا کاهش یابد.

#### ۴-۲- نتایج مدل‌سازی اسپری در شبکه‌های مختلف

همان‌طور که در مقدمه اشاره گردید، با پاشش قطرات اسپری در خلاف جهت جریان، انتظار می‌رود که سرعت نسبی بین قطرات و گاز پیرامون در مقایسه با پاشش در جهت جریان افزایش یابد. به دنبال این افزایش سرعت نسبی، زمان شکسته شدن و تبخیر قطرات کاهش می‌یابد. همچنین با فرض متعامد بودن راستای تزریق قطرات با راستای جریان گاز، قطره‌های با قطر بزرگ‌تر در عمق بیشتری از جریان نفوذ می‌کنند؛ در حالی که قطره‌های کوچک‌تر مومنتوم خود را زودتر از دست داده و سریع‌تر با جریان گاز هم‌مسیر می‌شوند. بنابراین با انتخاب الگوی اسپری مخروطی توخالی و پاشش آن در خلاف جهت جریان در لوله پیش مخلوط، می‌توان از دو ویژگی جریان فوق بهره برد. در این مکانیزم، با انتخاب الگوی اسپری مخروطی توخالی، می‌توان به مسیر کل قطرات تزریق شده نظم داد و طول نفوذ اسپری در جریان را کم کرد. این پراکندگی قطرات در فضای شعاعی لوله، سبب می‌شود که فرآیند تبخیر و اختلاط اسپری تسریع گردد. بنابراین در این تحقیق، پاشش بهینه با الگوی اسپری مخروطی توخالی به ترتیب با زوایای داخلی و خارجی ۳۰ و ۸۰ درجه بررسی شده، با حالت‌های متداول پاشش قطرات مقایسه گردیده است. برای این منظور، در

(۳۱)، (۳۴)، (۳۵) و (۳۶) به دست می‌آید. از آنجا که در فشار ۲۰ بار منحنی این پارامترها با دما در دسترس نبود، صحت سنجی محاسبات کسر مولی سوخت، مطابق با داده‌های زانگ [۴۲] و در فشار ۵۴/۸ بار انجام شده است. شکل ۳ مقایسه این نتایج برای دو فاز مایع و گاز را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که نتایج پیشگویی شده با داده‌های زانگ یکی است. در این شرایط، دمای نقطه بحرانی سوخت حدود ۵۳۶ کلوین می‌باشد.

برای ارزیابی مدل‌های به کار رفته در فرآیندهای انتقال جرم و حرارت، تبخیر یک قطره آن-هپتان تحت شرایط مختلف آزمایش

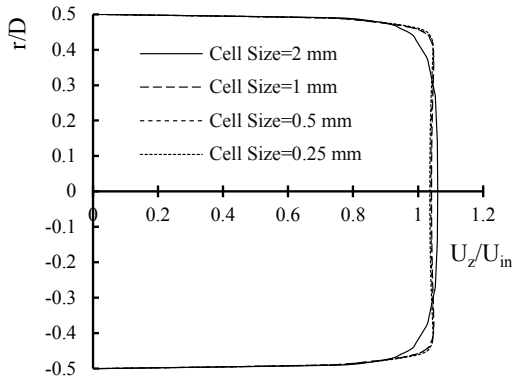


شکل ۳. منحنی دمای تعادل فاز بخار - مایع مخلوط آن-هپتان و نیتروژن بر حسب کسر مولی در فشار ۵۴/۸ بار

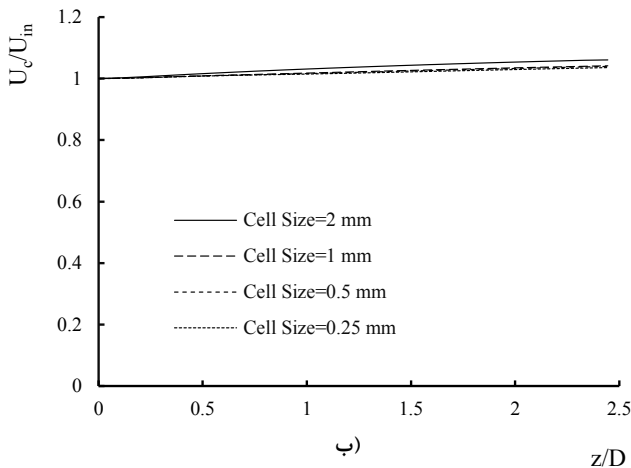
Fig. 3. Vapor-liquid equilibrium phase of n-heptane and Nitrogen mixture versus molar fraction at the pressure 54.85 bar

نومورا<sup>۱</sup> و همکاران [۴۳] و نزدیک به شرایط مساله پیش رو شبیه‌سازی شد و نتایج حاصل با این داده‌های تجربی مقایسه گردید. برای انجام این کار، یک قطره با قطر ۷۰۰ میکرون، دمای ۳۰۰ کلوین و سرعت اولیه بسیار ناچیز در یک محفظه حاوی گاز ازت با فشار ۲۰ بار تزریق گردید و فرآیند تبخیر این قطره در شرایط میکرو گرانش در دو دمای مختلف ۷۴۸ و ۴۵۲ کلوین مدل‌سازی گردید. شکل ۴ نتایج منحنی مجذور قطر قطره بر حسب زمان در این دماها را نمایش می‌دهد. از مقایسه این نتایج با داده‌های تجربی می‌توان ملاحظه نمود که با افزایش دمای گاز محیطی، شدت تبخیر قطره نسبت به مقادیر تجربی کمی کاهش یافته است. علت این کاهش را باید در مدل‌های انتقال جرم و حرارت انتخاب شده و نادیده گرفتن اثر توزیع دما داخل این





الف)



ب)

شکل ۵. تأثیر اندازه سلول محاسباتی شبکه بر الف) پروفیل سرعت خروجی ب) توزیع سرعت روی محور تقارن لوله.

Fig. 5. The effect of computational cell size on a) Outlet velocity profile b) Velocity distribution on the centerline

حالت‌های مختلف پاشش اسپری در جدول ۲ ارائه شده است.

شکل ۷ توزیع دمای جریان دو فازی در مقطع طولی لوله با حالت‌های مختلف پاشش را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌گردد در حالت‌های ۱ و ۲، که پاشش اسپری سوخت در خلاف جهت جریان است، قطرات در لوله پیش مخلوط به طور کامل تبخیر می‌شود.

در شکل ۸، توزیع سرعت، دما و کسر جرمی بخار سوخت در

جدول ۲. حالت‌های مختلف پاشش قطرات شبیه‌سازی شده در لوله پیش مخلوط  
Table 2. Different cases of fuel injection simulated in the premixed tube

حالت پاشش	زوایای داخلی و خارجی اسپری (°)	جهت پاشش
۱	۸۰-۳۰	خلاف جهت جریان
۲	۸۰-۰	خلاف جهت جریان
۳	۸۰-۳۰	هم‌جهت جریان
۴	۸۰-۰	هم‌جهت جریان

ابتدا جریان گاز ازت داخل لوله پیش مخلوط به قطر ۱۸ میلی‌متر و طول ۴۴ میلی‌متر با دما و سرعت ورودی به ترتیب ۸۰۰ کلوین و ۱۵ متر بر ثانیه و فشار خروجی ۲۰ بار برای حالت دائم شبیه سازی گردید. علت انتخاب گاز ازت، نزدیکی خواص ترمودینامیکی این گاز با هوا و جلوگیری از خود اشتعالی بخار سوخت با هوا می‌باشد. برای بررسی عدم وابستگی نتایج به اندازه شبکه، این جریان با اندازه‌های مختلف سلول محاسباتی مطابق جدول ۱ مدل سازی گردید.

جدول ۱- اندازه‌های مختلف شبکه محاسباتی لوله پیش مخلوط  
Table 1. Various cell sizes in the pre-mixed tube

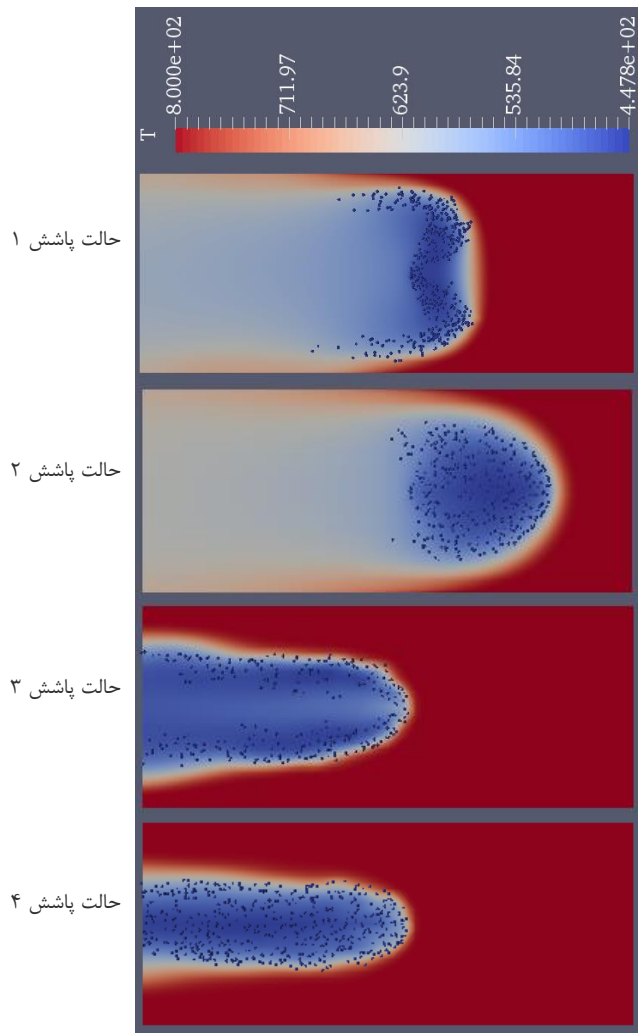
حالت	اندازه سلول سلول (mm)	تعداد سلول
۱	۲	۶۳۳۶
۲	۱	۵۰۶۶۸
۳	۰/۵	۲۸۱۶۰۰
۴	۰/۲۵	۲۰۷۲۵۷۶

نتایج این محاسبات نشان می‌دهد که با ریز کردن اندازه سلول‌های محاسباتی، نتایج به مقدار معینی همگرا می‌شود (شکل ۵).

پس از تعیین جریان دائمی در لوله پیش مخلوط، قطرات آن-هپتان به طور پیوسته از نقطه‌ای روی خط تقارن لوله به فاصله ۲۰ میلی‌متر از دهانه ورودی با سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه ولی در خلاف جهت جریان لوله با دبی جرمی ۰/۱۰۶۶ کیلوگرم بر ثانیه با نرخ ۱۰<sup>۷</sup> پارسل در ثانیه تزریق شده است. این قطرات دارای توزیع روزن-راملر با قطرهای کمتر از ۱۵۰ میکرون و قطر میانگین ۸۵ میکرون می‌باشد. پس از بررسی حساسیت نتایج با گام‌های زمانی مختلف و انتخاب بهینه گام زمانی ۱۰<sup>-۶</sup> ثانیه، تأثیر اندازه سلول محاسباتی شبکه بر نتایج مطابق شکل ۶ بررسی گردید.

این شکل، توزیع سرعت، دمای گاز و کسر جرمی بخار سوخت در حالت دائمی جریان روی محور تقارن لوله را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که با ریز کردن سلول‌های شبکه، بجز در نزدیکی انژکتور، وابستگی نتایج به شبکه کاهش می‌یابد. در نواحی نزدیک به انژکتور، چگالی قطرات بسیار زیاد است و فرض پیوسته بودن فاز گاز دیگر قابل قبول نمی‌باشد. از میان کمیت‌های اشاره شده، در این ناحیه سرعت گاز بیشتر به اندازه شبکه وابسته است.

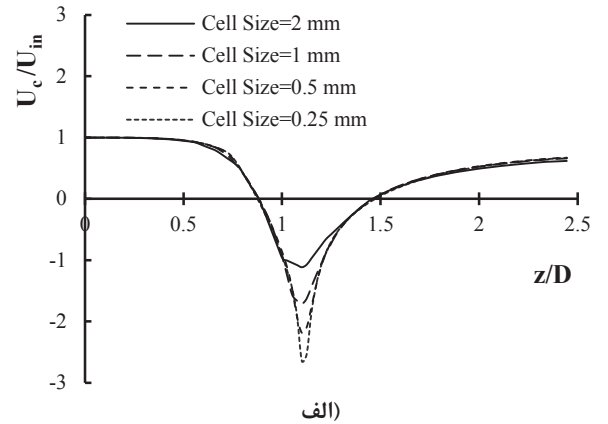
به منظور مقایسه عملکرد این نوع پاشش، پاشش قطرات با دیگر الگوهای متداول اسپری در لوله پیش مخلوط انجام گردیده است. کل



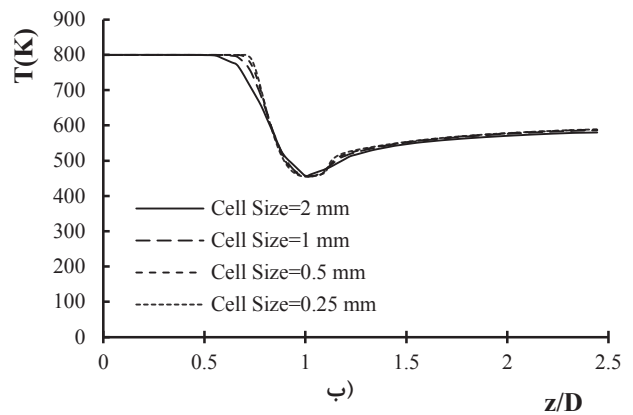
شکل ۷. توزیع دمای گاز در سطح مقطع طولی لوله پیش مخلوط برای حالت‌های مختلف پاشش

Fig. 7. Gas temperature distribution in the longitudinal section of the premixed tube for different cases of injections

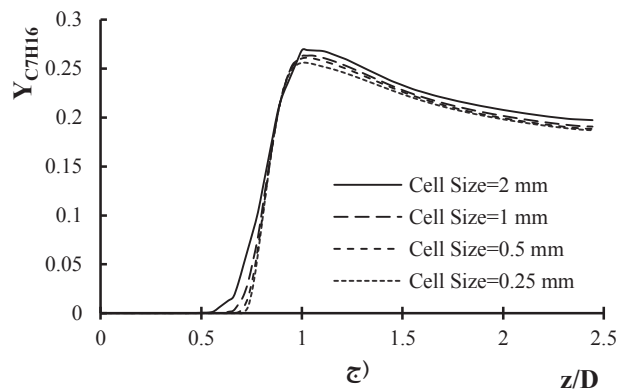
مخروط توخالی است. از آن جا که با کاهش فشار هوا، کاهش سرعت ورودی هوا و افزایش سرعت تزریق قطرات، این طول نفوذ افزایش می‌یابد، لذا اسپری با الگوی مخروط توپر نمی‌توان همواره در یک لوله پیش مخلوط با طول کوتاه به کار برد. بنابراین بهترین حالت پاشش اسپری، پاشش قطرات اسپری با الگوی مخروط توخالی و در خلاف جهت جریان است. نتایج محاسبات نشان داد که در شرایط محیطی با دمای ۸۰۰ کلوین و فشار ۲۰ بار، با پاشش قطرات ان-هپتان با الگوی مخروط توخالی با زوایای داخلی و خارجی به ترتیب حدود ۳۰ و ۸۰ درجه، توزیع یکنواخت‌تری از مخلوط بخار سوخت و هوا در خروجی لوله پیش مخلوط به دست می‌آید.



الف)



ب)



ج)

شکل ۶. تأثیر اندازه سلول‌های شبکه بر الف) سرعت خروجی گاز ب) دمای گاز ج) کسر جرمی بخار سوخت روی محور تقارن لوله

Fig. 6. The effect of computational cell size on a) Outlet gas velocity b) gas temperature c) fuel vapor mass fraction on the tube centerline

مقطع خروجی لوله ارائه داده شده است. مشاهده می‌شود که برای حالت‌های پاشش ۱ و ۲، که تزریق در خلاف جهت جریان می‌باشد، قطرات علاوه بر اینکه به طور کامل تبخیر می‌شوند، توزیع سرعت، دما و کسر جرمی بخار سوخت نیز یکنواخت‌تر و نوسانات جریان دو فازی کمتر از حالت‌های پاشش در جهت خلاف جریان است. همچنین برای این حالت‌های پاشش در جهت خلاف جریان، می‌توان دید که طول نفوذ قطرات در الگوی اسپری با مخروط توپر بیشتر از الگوی

واقعی توربین‌های گازی در نظر گرفته شده است. با توجه به فشار بالای گاز، اثر نفوذ مولکول‌های گاز به داخل قطرات سوخت در شدت تبخیر قطرات محاسبه شده است. این الگوی پاشش قطرات، همراه با روش‌های متداول پاشش اسپری در لوله پیش مخلوط شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل را می‌توان به طور خلاصه به صورت زیر بیان نمود:

- با پاشش قطرات اسپری سوخت، هم جهت با جریان عبوری از یک لوله پیش مخلوط در شرایط واقعی، امکان تبخیر کامل قطرات در یک لوله کوتاه میسر نمی‌باشد.

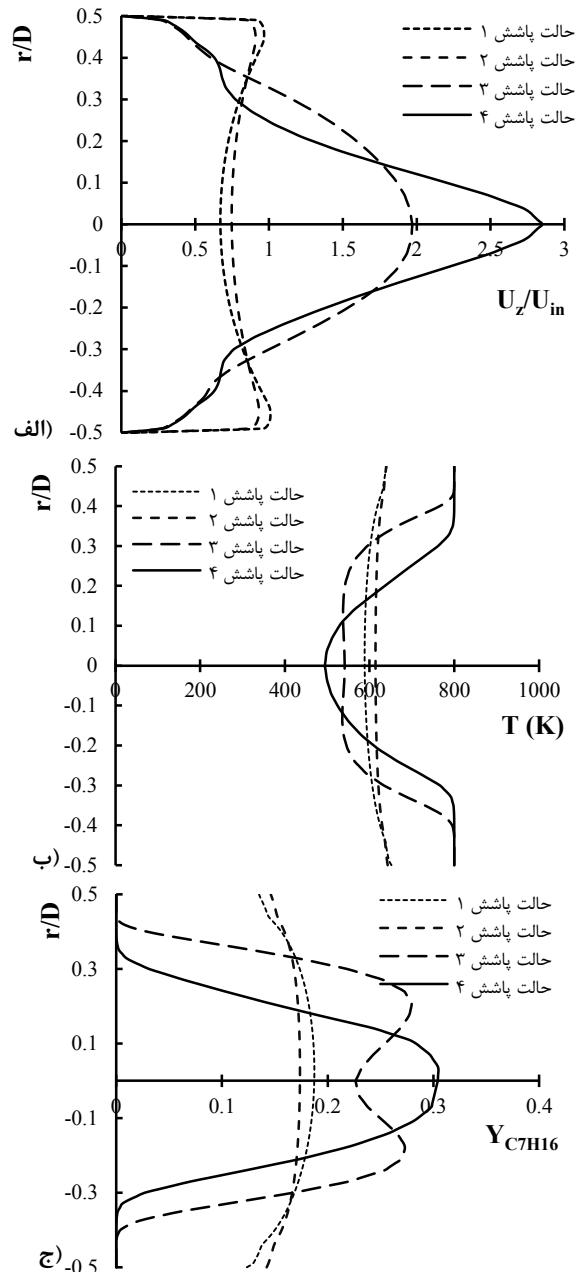
- با پاشش قطرات اسپری سوخت در خلاف جهت جریان، به دلیل افزایش سرعت نسبی قطرات و به دنبال آن تسریع در فرآیندهای شکست، تبخیر کامل قطرات در داخل لوله مهیا می‌باشد.

- برای حالت پاشش اسپری در خلاف جهت جریان، به منظور کاهش طول نفوذ اسپری و محدود کردن طول لوله پیش مخلوط، الگوی اسپری مخروط توخالی با زوایای داخلی و خارجی به ترتیب ۳۰ و ۸۰ درجه ارائه شده است. در این نوع پاشش، علاوه بر تبخیر کامل قطرات در یک فضای محدود، توزیع یکنواختی از دمای گاز و کسر جرمی بخار سوخت در خروجی لوله نیز به دست می‌آید.

### فهرست علائم

### علائم یونانی

$\alpha$	ضریب پخش حرارتی ( $m^2s^{-1}$ )
$\Delta V$	حجم سلول محاسباتی ( $m^3$ )
$\varepsilon$	تلفات انرژی توربولانس ( $m^2s^{-1}$ )
$\theta$	زاویه اسپری ( $^\circ$ )
$k$	ضریب پخش حرارت هدایتی ( $m^2s^{-1}$ )
$\mu$	لزجت دینامیکی
$\nu$	حجم مخصوص ( $m^3kg^{-1}$ )
$\pi$	عدد ثابت پی
$\rho$	جرم حجمی ( $kg/m^3$ )
$\sigma$	کشش سطحی قطره
$\tau_e$	زمان سکونت تبخیر (S)
$\tau_h$	زمان سکونت انتقال حرارت (S)
$\tau_u$	زمان سکونت مومنتم قطره (S)
$\hat{\phi}$	ضریب فوگاسیته
$\omega$	ضریب خارج از مرکز در معادله حالت پنگ - رابینسون



شکل ۸: تأثیر نوع الگوی پاشش قطرات سوخت بر توزیع الف) سرعت گاز ب) دمای گاز و ج) کسر مولی بخار سوخت در خروجی لوله  
 Fig. 8. The effect of spray pattern of the fuel injection on a) Outlet gas velocity b) gas temperature c) fuel vapor mass fraction on the tube centerline

### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور تبخیر کامل قطرات سوخت در لوله پیش مخلوط و پیش تبخیر توربین‌های گازی، مکانیزمی جهت پاشش قطرات سوخت در خلاف جهت جریان گاز ارائه شده است. به منظور بررسی رفتار این الگوی پاشش قطرات، جریان دو فازی اسپری قطرات در داخل یک لوله با روش اویلری - لاگرانژی مدل‌سازی گردید. دما و فشار بالای گاز داخل لوله پیش مخلوط، مطابق شرایط

## علائم انگلیسی

F	لایه نازک فیلم اطراف قطره	$a, a_i, a_j, a_{ij}$	ضرایب موجود در معادله حالت پینگ - رابینسون ( $m^2s^{-2}$ )
h	مربوط به معادله بقای آنتالپی	A	پارامتر تعریف شده در محاسبه ضریب فوگاسیته
i	گونه $i$ ام	$b, b_i$	ضرایب موجود در معادله حالت پینگ - رابینسون ( $m^3kg^{-1}$ )
l	فاز مایع	$B, B_i$	پارامترهای تعریف شده در محاسبه ضریب فوگاسیته
m	مربوط به معادله بقای جرم	C	غلظت ( $mole.m^{-3}$ )
s	سطح قطره	$C_d$	ضریب نیروی درگ وارد بر قطره
sat	حالت اشباع	$C_p$	گرمای ویژه ( $Jkg^{-1}K^{-1}$ )
t	توربولانس	$C_{1-C3}$	ضرایب موجود در معادلات توربولانس لاندنر - شارما
u	مربوط به معادله بقای مومنتم	d	قطر قطره (m)
v	فاز بخار	$D_{diff}$	ضریب نفوذ مولکولی گونه‌ها ( $m^2s^{-1}$ )
$Y_i$	مربوط به معادله بقای گونه $i$	f	ضریب تصحیح انتقال حرارت یک قطره در حال تبخیر
z	مؤلفه در راستای محور لوله	$f_1, f_2, f_{\mu}$	ضرایب موجود در معادلات توربولانس لاندنر - شارما
0	اولیه	g	نیروی گرانش ( $ms^{-2}$ )
$\infty$	بین‌هایت	h	آنتالپی مخصوص ( $Jkg^{-1}$ )
		$h_m$	ضریب انتقال جرم ( $ms^{-1}$ )
		$h_{fg}$	آنتالپی نهان تبخیر ( $Jkg^{-1}$ )
		$\bar{H}_i$	آنتالپی جزئی گونه $i$ ( $Jkg^{-1}$ )
		k	انرژی جنبشی توربولانس ( $m^2s^{-2}$ )
		$k_{ij}$	ضریب عکس‌العمل در معادله حالت پینگ - رابینسون
		$m_d$	جرم قطره (kg)
		$M_w$	جرم مولکولی ( $kg.mole^{-1}$ )
		$N_p$	تعداد پارسل‌ها در یک سلول
		$Nu$	عدد ناسلت
		P	فشار (pa)
		q	ضریب ثابت در رابطه روزن - رامبلر
		R	ثابت جهانی گازها ( $Jkg^{-1}k^{-1}$ )
		Re	عدد رینولدز
		Pr	عدد پرانتل
		S	جملات در معادلات بقای ناشی از فاز مایع
		Sc	عدد اشمیت
		Sh	عدد شروود
		t	زمان (s)
		T	دما (K)
		u	بردار سرعت (m/s)
		$U_c$	سرعت در راستای خط مرکز لوله (m/s)
		x	کسر مولی
		X	ضریب ثابت در رابطه روزن - رامبلر
		y	کسر جرمی
		z	موقعیت محوری
		Z	ضریب تراکم پذیری

## زیرنویس‌ها

C نقطه بحرانی

d قطره

## مراجع

- [1] Y. Wang, C.J. Rutland, DNS study of the ignition of n-heptane fuel spray under high pressure and lean conditions, Journal of Physics: Conference Series, 16 (2005) 124-128.
- [2] F. Wang, A.I. Sayma, Z.J. Peng, Y. Huang, A Multi-Section Droplet Combustion Model for Spray Combustion Simulation, in: ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, American Society of Mechanical Engineers, Vancouver, British Columbia, Canada, 2011, pp. 7-16.
- [3] C.H. Beck, R. Koch, H.-J. Bauer, Investigation of the effect of incomplete droplet prevaporization on NOx emissions in LDI combustion systems, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 130(5) (2008) 051504.
- [4] X. Gu, S. Basu, R. Kumar, Vaporization and collision modeling of liquid fuel sprays in a co-axial fuel and air pre-mixer, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55(19-20) (2012) 5322-5335.
- [5] X. Gu, S. Basu, R. Kumar, Correlations of vaporization performance of conventional and biofuel sprays in a crossflow heated chamber, International Communications in Heat and Mass Transfer, 39(10) (2012) 1478-1486.
- [6] X. Gu, S. Basu, R. Kumar, Dispersion and vaporization of biofuels and conventional fuels in a

- Combustion, 2nd ed., Edwards, 2005.
- [19] S.K. Aggarwal, A review of spray ignition phenomena: Present status and future research, *Progress in Energy and Combustion Science*, 24(6) (1998) 565-600.
- [20] A. Omidvar, Numerical Modeling and Analysis of Turbulence Effect on Breakup Dynamic of Evaporating Spray Droplets, Ph.D Thesis, Tarbiat Modarres University, Tehran, 2009.
- [21] D.D. Ganji, Three dimensional liquid spray modeling in internal combustion engines, Tarbiat Modarres University, Tehran, 2004.
- [22] F. Mashayek, Droplet-turbulence interactions in low-Mach-number homogeneous shear two-phase flows, *Journal of Fluid Mechanics*, 367 (1998) 163-203.
- [23] S. Gorji, M. Seddighi, C. Ariyaratne, A.E. Vardy, T. O'Donoghue, D. Pokrajac, S. He, A comparative study of turbulence models in a transient channel flow, *Computers & Fluids*, 89 (2014) 111-123.
- [24] T.A. Abul Kalam Azad, Computational Modeling of Turbulent Ethanol Spray Flames in a Hot Diluted Coflow using OpenFOAM, Delft University of Technology 2015.
- [25] M.M. El Wakil, O.A. Uyehara, A theoretical investigation of the heating-up period of injected fuel droplets vaporizing in air, University of North Texas, 1954.
- [26] E. Babinsky, P.E. Sojka, Modeling drop size distributions, *Progress in energy and combustion science*, 28(4) (2002) 303-329.
- [27] A.H. Lefebvre, D.R. Ballal, *Gas Turbine Combustion Alternative Fuels and Emissions*, CRC Press/Taylor & Francis Group, 2010.
- [28] M.A. Patterson, R.D. Reitz, Modeling the effects of fuel spray characteristics on diesel engine combustion and emission, 0148-7191, SAE Technical Paper, 1998.
- [29] F.P. Kärrholm, Numerical modelling of diesel spray injection, turbulence interaction and combustion, Chalmers University of Technology, Goteborg, 2008.
- [30] P. Ghadimi, M. Yousefifard, H. Nowruzi, Applying crossflow pre-mixer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(1-3) (2012) 336-346.
- [7] H. Zhang, B. Bai, L. Liu, H. Sun, J. Yan, Mixing of hollow-cone spray with a confined crossflow in rectangular duct, *AIAA journal*, 51(3) (2013) 615-622.
- [8] M. Brandt, M. Rachner, G. Schmitz, An experimental and numerical study of kerosine spray evaporation in a premix duct for gas turbine combustors at high pressure, *Combustion Science and Technology*, 138(1-6) (1998) 313-348.
- [9] S. Deshpande, J. Gao, M.F. Trujillo, Characteristics of hollow cone sprays in crossflow, *Atomization and Sprays*, 21(4) (2011).
- [10] R. Surya Prakash, H. Gadgil, B.N. Raghunandan, Breakup processes of pressure swirl spray in gaseous cross-flow, *International Journal of Multiphase Flow*, 66(0) (2014) 79-91.
- [11] H. Zhang, B. Bai, L. Liu, H. Sun, J. Yan, Droplet dispersion characteristics of the hollow cone sprays in crossflow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 45(0) (2013) 25-33.
- [12] A. Sinha, R.S. Prakash, A.M. Mohan, R.V. Ravikrishna, Airblast spray in crossflow-structure, trajectory and droplet sizing, *International Journal of Multiphase Flow*, 72 (2015) 97-111.
- [13] B. Bai, H. Sun, H. Zhang, L. Liu, Numerical study on turbulent mixing of spray droplets in crossflow, *Journal of Propulsion and Power*, 27(1) (2011) 132-143.
- [14] W. Wang, H. Zhang, Z. Zhao, Q. Zheng, B. Bai, Mixing of hollow-cone water spray in a confined high-temperature gas crossflow, *Computers & Fluids*, (2017).
- [15] C.T. Crowe, M.P. Sharma, D.E. Stock, The particle-source-in cell (PSI-CELL) model for gas-droplet flows, *Journal of fluids engineering*, 99(2) (1977) 325-332.
- [16] S. Subramaniam, Lagrangian-Eulerian methods for multiphase flows, *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(2) (2013) 215-245.
- [17] K.K. Kuo, *Principles of combustion*, (1986).
- [18] T. Poinso, D. Veynante, *Theoretical and Numerical*

- [36] M.D. Koretsky, Engineering and chemical thermodynamics, Wiley Hoboken, NJ, 2004.
- [37] H. Jasak, Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows, Imperial College London London, 1996.
- [38] H.G. Weller, G. Tabor, H. Jasak, C. Fureby, A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques, Computers in physics, 12(6) (1998) 620-631.
- [39] OpenFoam, The Open Source CFD Toolbox, User Guide, Version, 1(9) (2008).
- [40] G. Reich, H. Beer, Fluid flow and heat transfer in an axially rotating pipe—I. Effect of rotation on turbulent pipe flow, International journal of heat and mass transfer, 32(3) (1989) 551-562.
- [41] A.J. Ward-Smith, Internal fluid flow-the fluid dynamics of flow in pipes and ducts, NASA STI/Recon Technical Report A, 81 (1980).
- [42] L. Zhang, Multicomponent drop vaporization modeling of petroleum and biofuel mixtures, Iowa State University, Ames, 2011.
- [43] H. Nomura, Y. Ujiie, H.J. Rath, J.i. Sato, M. Kono, Experimental study on high-pressure droplet evaporation using microgravity conditions, Symposium (International) on Combustion, 26(1) (1996) 1267-1273.
- Different Strategies within OpenFOAM to Investigate the Effects of Breakup and Collision Model on the Spray and in-Cylinder Gas Mixture Attribute, Journal of Applied Fluid Mechanics, 9(6) (2016).
- [31] J.L. Santolaya, J.A. García, E. Calvo, L.M. Cerecedo, Effects of droplet collision phenomena on the development of pressure swirl sprays, International Journal of Multiphase Flow, 56 (2013) 160-171.
- [32] N. Nordin, Complex chemistry modeling of diesel spray combustion, Chalmers University of Technology, Goteborg, 2001.
- [33] G.S. Zhu, S.K. Aggarwal, Fuel droplet evaporation in a supercritical environment, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power (Transactions of the ASME), 124(4) (2002) 762-770.
- [34] L. Zhang, S.-C. Kong, High-pressure vaporization modeling of multi-component petroleum-biofuel mixtures under engine conditions, Combustion and Flame, 158(9) (2011) 1705-1717.
- [35] W. Long, P. Yi, M. Jia, L. Feng, J. Cui, An enhanced multi-component vaporization model for high temperature and pressure conditions, International Journal of Heat and Mass Transfer, 90 (2015) 857-871.