

بررسی تبخیر اکسیدکننده پاشش شده از انژکتور فشاری-پیچشی در محفظه احتراق در شرایط فشار پایین

روزبه خداوردیان^{۱*}، محمدرضا مراد^۲، محمدرضا جهان نما^۳، علی رضا رضانی^۴ و آزاده کبریایی^۵

۱- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، roozbehkhodaverdian@alum.sharif.edu

۲- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، morad@sharif.ir

۳- دانشیار، پژوهشکده سامانه های حمل و نقل فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، m.jahannama@isrc.ac.ir

۴- کارشناس ارشد، پژوهشکده سامانه های حمل و نقل فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ramezani_a@alum.sharif.edu

۵- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، kebriaae@sharif.edu

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۹/۰۷/۰۷، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۹/۱۰/۰۹، پذیرش: ۹۹/۱۱/۱۸)

چکیده: در این مطالعه، تبخیر اکسیدکننده مایع در مرحله شروع به کار در محفظه احتراق یک رانشگر فضایی به صورت عددی با نرم افزار فلونتت بررسی می شود. در مرحله استارت رانشگر، ابتدا بخشی از اکسیدکننده، که بر اثر تجزیه به صورت گازی درآمده است، وارد محفظه شده و باعث افزایش فشار آن می شود (در این مطالعه تا ۰/۲ بار). اکنون امکان این وجود دارد که اکسیدکننده پاشش شده به صورت مایع خارج شود و می توان تبخیر قطرات مایع را در این فشار بررسی کرد. در رانشگر مورد بررسی نرخ پاشش سوخت ۳ گرم بر ثانیه و انژکتور مورد استفاده از نوع فشاری-پیچشی است. بررسی عددی در این پژوهش مبتنی بر ساختار اویلر-لاگرانژ بر پایه روش ذره گسسته است که برهمکنش میان فازهای گاز و مایع را به طور همزمان توسط معادلات اساسی ناویر-استوکس مورد مطالعه قرار می دهد. نتایج حاصل از صحنه گذاری روش عددی، قابلیت این روش در تخمین کمی و کیفی پارامترهای متاثر از تبخیر آبی همانند فشار، دما و فوق داغی در قطرات اسپری را مورد تایید قرار می دهد. هر چند نقش تبخیر آبی در تغییر دما و فشار قطرات به عنوان فاز گسسته و نیز گاز محیطی به عنوان فاز پیوسته مشهود است، ولی همزمان با آن می توان میل این دو فاز به شرایط پایدار و ایجاد حالت پایا را مشاهده کرد. بررسی این موضوع حاکی از زمانی در حدود ۲۰ میلی ثانیه است که تعادلی دمایی در حد ۲۶۴ کلوین در هر دو فاز و فشاری ثابت در حد ۷ کیلو پاسکال را در محفظه ایجاد می کند.

کلیدواژگان: تبخیر آبی، رانشگر فضایی، محفظه احتراق، اکسند مایع، انژکتور فشاری-پیچشی

مقدمه

پس از قرارگرفتن ماهواره های مخابراتی در مدار مورد نظر، کنترل وضعیت از مهم ترین فاکتورهای مورد توجه در طراحی ماهواره های مخابراتی است. کنترل وضعیت خود به دو نوع زاویه ای و خطی تقسیم می شود [۱]. کنترل وضعیت زاویه ای به وسیله ژيروسکوپ ها و با استفاده از انرژی جذب شده توسط سلول های خورشیدی امکان پذیر است. در کنترل وضعیت خطی اما، با وجود طراحی مفهومی فناوری های جدیدی نظیر بادبان های خورشیدی، همچنان انتخاب اولیه رانشگرها^۱ هستند [۲]. اساس کار رانشگرها بر یک جت سیال است که تکانه خطی برای حرکت ماهواره را تامین می کند. رانشگرها به طور کلی به سه دسته گاز سرد، تک سوختی و دومولفه ای^۲ (سوخت و اکسند) بخش بندی می شوند [۲]. در این مقاله، شبیه سازی عددی مربوط به بخشی از عملکرد محفظه احتراق یک رانشگر دومولفه ای در مراحل اولیه ارائه می شود.

1. Thruster
2. Bi-Propellant

برای انجام اشتعال در محفظه احتراق می‌بایست ابتدا فشار به میزان مشخصی برسد. بنابراین، شروع به کار پالس رانشگر دومولفه‌ای با تزریق تنهای اکسندۀ آغاز می‌شود [۳]. پس از رسیدن فشار محفظه احتراق به اندازه مشخص‌شده، سوخت به‌صورت هم‌محور به محفظه احتراق تزریق می‌شود. در مدت زمان کوتاهی همه اکسندۀ پاشش‌شده در محفظه احتراق به‌صورت گازی است و پس از آن رانشگر وارد مرحله‌ای می‌شود که فشار محفظه احتراق کمی بالا رفته و اکنون اکسندۀ به‌صورت مایع وارد مخزن می‌شود. ذکر این نکته لازم است که همچنان سوختی وارد مخزن نشده است. بررسی تبخیر قطرات مایع خارج‌شده از انژکتور در محفظه احتراق در مرحله فوق از یک انژکتور فشاری-پیچشی^۱ و تاثیرات آن بر دما و فشار و سرعت گاز درون محفظه احتراق هدف این مطالعه است.

نکته‌ای که می‌بایست مورد توجه قرار بگیرد این است که در این مطالعه چالش اصلی بالاتر بودن دمای مایع تزریق‌شده به محفظه احتراق نسبت به دمای جوش همان مایع در فشار محفظه است. در این شرایط مایع در یک حالت غیرتعادلی قرار داشته و پدیده‌ای به‌نام تبخیر آبی^۲ صورت می‌گیرد [۴]. به این شکل که دمای محیط و مایع غیرتعادلی در مدت کوتاهی به‌شدت کاهش یافته و انرژی لازم برای تبخیر بخشی از قطره را تامین می‌کند. همچنین، طی فرایند تبخیر آبی مکانیزم امتیازسیون جت مایع نیز به‌شدت تحت تاثیر قرار گرفته و قطره‌های ناشی از آن ریزتر می‌شوند. از اولین مواردی که پدیده تبخیر آبی مورد توجه قرار گرفت می‌توان به مطالعه تجربی ریتز [۵] در سال ۱۹۹۰ اشاره کرد. ایشان در این پژوهش قطر قطرات و شکل اسپری را در حالت تبخیر آبی با حالت غیرآبی مقایسه کرد. در سال ۱۹۹۷، آدچی و همکاران [۶]، با مطالعه بخار ناشی از تبخیر آبی، عکس‌برداری از پدیده تبخیر آبی و همچنین مطالعه تحلیلی، روابطی تجربی برای آهنگ تبخیر آبی به‌دست آوردند. در سال ۲۰۰۰، زو و همکاران [۷]، با استفاده از روابط آدچی و همکاران و اعمال یک روش اویلری-لاگرانژی، توانستند تبخیر یک اسپری ناشی از انژکتور با دهانه^۳ معمولی را به‌دست آورند. اشمهل و استیلانت، در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹، طی سه پژوهش [۸، ۹، ۱۰] روش اویلری-لاگرانژی را بر مرحله اولیه پاشش سوخت در محفظه احتراق یک فضاپیما اعمال کردند. در سال ۲۰۱۷، رمکه و همکاران [۱۰] مدل تبخیر را با استفاده از نرم‌افزار فلوننت در محیط DPM^۴ بر یک محفظه احتراق با فشار پایین اعمال کرد. در این پژوهش نیز، با استفاده از نرم‌افزار فلونت و همچنین روش اویلری-لاگرانژی DPM، ابتدا، سعی می‌شود تبخیر مایع در شرایط آبی درون محفظه احتراق بررسی شود. برای صحت‌گذاری روش توسعه داده‌شده، از مطالعه رمکه و همکاران استفاده خواهد شد.

به‌طور کلی، در انبوه مقالاتی که در حین مطالعات اولیه درباره پیش‌رانه فضاپیما مورد بررسی قرار گرفت، مسئله بررسی ناپایایی اسپری اکسندۀ در خلا، به‌ویژه در مرحله اولیه (شروع به کار)، سهم کوچکی داشته و جواب‌های موجود برای چالش‌های پاشش مایع در خلا (به‌طور خاص تبخیر آبی) بسیار محدودند. با وجود این، رانشگر ماهواره زمان کارکردی کم (در مقیاس ثانیه) دارد و در نتیجه اهمیت این بخش از کارکرد رانشگر تشدید می‌شود. در مطالعات بررسی شده هیچ موردی از بررسی مرحله شروع به پاشش در رانشگر با سوخت خوداشتعال یافت نشد. در این مقاله، سعی شده تا یکی از دقیق‌ترین راه‌حل‌های بررسی‌شده برای شناخت بهتر پاشش مایع فوق‌داغ در خلا، در این مرحله از کارکرد این نوع رانشگر خاص اعمال شود.

تبخیر آبی و روش عددی مورد استفاده

پس از تزریق مایع داخل یک محیط کم‌فشار، پدیده‌ای به‌نام تبخیر آبی رخ می‌دهد. این پدیده نیازمند شناخت ما از حالت‌های پایا و غیرپایاست که به نوع دوم فرآیند^۵ هم گفته می‌شود. در شکل ۱، نمودار فاز یک سیال مشاهده می‌شود.

1. Pressure-Swirl
2. Flash Evaporation
3. Orifice
4. DPM- Discrete Phase Model
5. Meta-State

ماده داخل مخزن اکسیدکننده در حالت A (مایع) است. در صورت تزریق مایع به محیط افت فشار در دمای ثابت مشاهده می‌شود. در این حالت، چون مایع فرصت تبخیر شدن را پیدا نمی‌کند، ولی در فشار پایین جدید است، فرآهالتی به نام مایع فوق داغ ایجاد می‌شود. حالت B در شکل ۱ محدوده دما و فشار مایع فوق داغ را نشان می‌دهد، اما مایع بودن آن را نشان نمی‌دهد به این دلیل که نمودار فاز فرآهالت‌ها را پوشش نمی‌دهد. این فرایند از جهت تغییر فاز به دلیل افت ناگهانی فشار شباهت بسیاری با کاویتاسیون دارد. این حالت در سیستم‌های لوله‌کشی نمود بسیاری دارد. اما، تفاوت آن این است که در کاویتاسیون فاز غالب مایع بوده و حباب‌هایی از گاز درون مایع برای رسیدن به تعادل به وجود می‌آید و در نهایت فشار به بالا بر می‌گردد. اما، در مسئله تبخیر آبی فاز غالب فاز گازی است و سیال در نهایت مقداری از جرم و دمای خود را از دست داده و با محیط به تعادل می‌رسد. این مفهوم در شکل ۲ قابل مشاهده است.

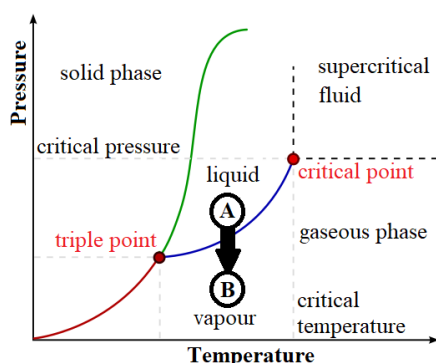


Figure 1- Phase Diagram and Flashing
شکل ۱- نمودار فاز و فرایند تبخیر آبی

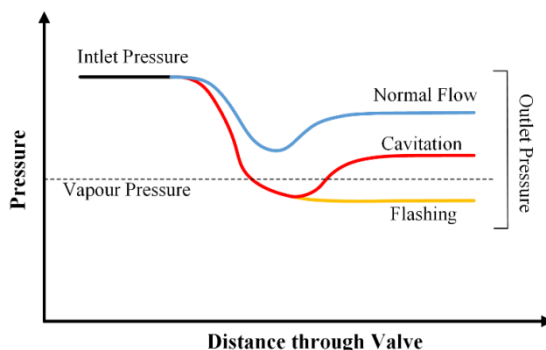


Figure 2- Flashing vs Cavitation
شکل ۲- تفاوت تبخیر آبی و کاویتاسیون

ذکر این نکته لازم است که برای عددی کردن میزان فوق داغی^۱ از رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$\Delta T = T_l - T_{sat}(@P_{atm}) \quad (1)$$

در این رابطه ΔT میزان فوق داغی، T_l دمای مایع فوق داغ و $T_{sat}(@P_{atm})$ دمای اشباع در فشار نقطه مورد نظر است. روش مورد استفاده در مدل عددی این مقاله مدل اوپلری-لاگرانژی برپایه روش ذره گسسته (DPM) است. در این روش، میدان حل یک فاز پیوسته (گاز) و یک فاز گسسته (مایع) خواهد داشت. میدان پیوسته به حالت معمول در روش حجم محدود گسسته‌سازی می‌شود. معادلات ناویر استوکس برای فاز پیوسته (سیال گازی) نوشته می‌شود ولی درون این معادلات جملات

1. Superheat

چشمه‌ای از طرف فاز گسسته اعمال می‌شود. فاز گسسته بسته‌هایی^۱ هستند که هرکدام از آن‌ها یک موقعیت هندسی درون میدان حل و داخل یک سلول محاسباتی فاز پیوسته دارند. این بسته‌ها هرکدام نماینده و حاوی تعدادی ذره (یا همان قطره مایع) هستند. این ذره‌ها خواص ترمودینامیکی یکسانی دارند و قطر همه آن‌ها با هم برابر است. در فاز گسسته نیز معادلات حرکت و در واقع نیروی وارد بر ذره وابسته به خواص ترمودینامیکی و همچنین دینامیکی سیال فاز پیوسته است. این نیروها با توجه به روابط برهمکنش ذره-سیال در جریان دوفازی به دست می‌آیند. شکل ۳ به اختصار روش ذره گسسته را به تصویر می‌کشد.

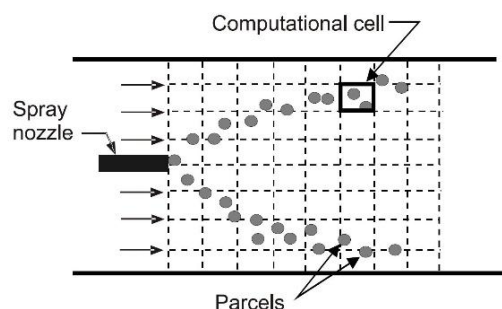


Figure 3- DPM Method and Parcels of Particles
 شکل ۳- بسته‌های ذرات و روش ذره گسسته

روابط حاکم

در ابتدا، معادلات تکانه دو فاز پیوسته و گسسته معرفی می‌شوند. در فاز پیوسته از معادلات نویر استوکس استاندارد مطابق رابطه (۲) همراه با یک چشمه تکانه استفاده می‌شود. در حل چنین مسئله‌ای، که پدیده تبخیر آبی در محفظه احتراق را بررسی می‌کند، استفاده از مدل کی-پسیلون استاندارد، که مدلی دومعادله‌ای است، کفایت می‌کند [۱۰]. نرخ سرعت پیچشی نسبت به سرعت در راستای محور محفظه چشمگیر نیست و مسیر طی شده توسط قطرات در مقایسه با مسیر طی شده ذره‌های سیال در توربین‌ها و سایر تکنولوژی‌ها با اعضای چرخنده، تغییر ناگهانی کمی دارد. بنابراین، استفاده از مدل تنش رینولدز^۲ لازم نیست. با وجود این، برای لحاظ کردن اثرات اغتشاش در بازگشت قطرات از سطح محفظه یک مدل اصلاح کارکرد دیواره^۳ در نظر گرفته شده است. مسیر حرکت گاز ناشی از احتراق و مخلوط شدن یا پخش آن نیز مورد توجه نیست و بیشتر شدن فشار محفظه ملاک کار رانشگر است. پس استفاده از مدل شبیه‌ساز گردابه بزرگ^۴ نیز لازم نیست. در مطالعات مرجع مشابه نیز از مدل کی-پسیلون استفاده شده است [۹،۸،۳]. پس در ادامه با همین مدل برای شبیه‌سازی تکانه در مسئله کار خواهد شد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

در این رابطه، u_i و u_j مولفه‌های سرعت در سه راستا، P و فشار و چگالی، μ لزجت و جمله آخر در سمت راست معادله معرف تغییرات تانسور تنش رینولدز است.

معادله انرژی فاز پیوسته به صورت معادله (۳) است.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right) + \nabla \cdot \left[u \left(\rho \left(h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right) + p \right) \right] = \nabla \cdot \left(\lambda_{eff} \nabla T - \sum h_{i,j} + (\bar{\tau}_{eff} u) \right) + S_{heat} \quad (3)$$

1. Parcel
2. Reynolds Stress Model (RSM)
3. Enhanced Wall Treatment
4. Large Eddy Simulation (LES)

در این رابطه، u اندازه سرعت، h انتروی، λ ضریب انتقال حرارت رسانشی، J دبی جرمی نفوذی و Sh_{heat} میزان انرژی منتقل شده به این فاز است که میزان آن لازم است با توجه به فرایند تبخیر آبی به دست آید. در سمت چپ این معادله، جمله اول تغییرات انرژی در المان و جمله دوم ورود و خروج انرژی از المان را نشان می‌دهد. در سمت راست، جمله اول تغییرات انرژی به علت رسانش، نفوذ و اضمحلال لزجتی نشان داده شده است.

معادله حرکت در فاز گسسته برای یک قطره به صورت رابطه (۴) است [۱۰].

$$\frac{du_p}{dt} = (u_\infty - u_p) \frac{18\mu_\infty C_d Re_p}{24\rho_p d_p^2} + \frac{g(p_p - p_\infty)}{\rho_p} \quad (4)$$

در این رابطه، u_p و u_∞ به ترتیب سرعت فاز گسسته و پیوسته d_p قطر قطره، Re عدد رینولدز قطره و C_d ضریب پسا برای قطره متحرک در فاز پیوسته است. عبارت اول در سمت راست معادله بیانگر نیروی پسا و بر ذره گسسته توسط فاز پیوسته و عبارت دوم نیروی گرانش وارد بر ذره گسسته است. در این رابطه، عدد رینولدز به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$Re_p = \frac{\rho_\infty d_p |u_p - u_\infty|}{\mu_\infty} \quad (5)$$

ضریب پسا در رابطه (۴) برای یک قطره کروی در نظر گرفته می‌شود که مطابق رابطه (۶) تعریف می‌شود. ضرایب a_1 ، a_2 و a_3 از مقاله مرسی و الکساندر [۱۱] به دست می‌آیند.

$$C_d = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (6)$$

روابط مربوط به پایستگی جرم و انرژی برای حالت فوق داغی مثبت (حالت آبی) و فوق داغی منفی (حالت غیرآبی) متفاوت است. در حالت غیرآبی، نرخ تبخیر از رابطه (۷) به دست می‌آید [۱۲].

$$N_i = k_c (C_{i,s} - C_{i,\infty}) \quad (7)$$

در این رابطه، N_i شار انتقال جرم، k_c ثابت انتقال حرارت و $C_{i,s}$ و $C_{i,\infty}$ به ترتیب میزان غلظت مولی مربوط به گونه مایع در سطح قطره و سلول محاسباتی اند.

در این معادله، مجهول ما تنها ثابت انتقال است که با عدد شروود که به صورت معادله (۸) تعریف می‌شود به دست می‌آید.

$$Sh_{AB} = \frac{k_c d_p}{D_{i,m}} = 2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3} \quad (8)$$

در رابطه فوق، $D_{i,m}$ ضریب نفوذ جرمی در قانون فیک برای دو سیال (سیال فاز گسسته و پیوسته) است و Sc عدد اشویت است.

همچنین، قانون انرژی که میزان انتقال حرارت بین دو فاز را نشان می‌دهد از رابطه (۹) به دست می‌آید [۱۲].

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) \quad (9)$$

h در رابطه فوق ضریب همرفتی انتقال حرارت است و A_p مساحت قطره را نشان می‌دهد. در این رابطه، ضریب انتقال حرارت همرفتی از عدد نوسلت مطابق رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

$$Nu = \frac{h d_p}{k_\infty} = 2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr^{1/3} \quad (10)$$

در حالتی که میزان فوق داغی بیش از صفر باشد (حالت آبی)، روابط مربوط به تبخیر (انتقال جرم و انرژی) با توجه به فیزیک تبخیر آبی تغییر می‌کند. تبخیر آبی طبق مطالعه آداجی [۶] به شکل رابطه (۱۱) صورت می‌پذیرد [۱۰].

$$\dot{m} = \frac{\alpha_{sh} A (T_d - T_b)}{\Delta h_v} \quad (11)$$

که در آن ضریب آلفای مربوط به فوق داغی، با توجه به میزان فوق داغی از روابط (۱۲) به دست می‌آیند.

$$\alpha_s = \begin{cases} 0.76 \Delta T^{0.26} & 0K \leq \Delta T \leq 5K \\ 0.027 \Delta T^{2.33} & 5K < \Delta T \leq 25K \\ 13.8 \Delta T^{0.39} & 25K < \Delta T \end{cases} \quad (12)$$

سه‌م کوچک‌تری از انتقال جرم نیز به‌واسطه اثرات همرفتی و رسانشی صورت می‌گیرد. در رابطه (۱۳) رابطه انتقال جرم به قطره بر اثر این پدیده‌ها دیده می‌شود.

$$\dot{m}_{cond} = 2\pi \frac{\lambda_{ref}}{c_{p,ref}} r_d \frac{Nu}{1 + \frac{\dot{m}_{flash}}{\dot{m}_{cond}}} \ln \left[1 + \left(1 + \frac{\dot{m}_{flash}}{\dot{m}_{cond}} \right) \frac{h_{\infty} - h_b}{\Delta h_v} \right] \quad (13)$$

اثرات سرعت لغزشی در این مسئله وجود دارد. برای اعمال این اثرات بر دبی جرمی همرفتی از تابع (۱۴)، که توسط زو [۷] به‌دست آمده است، استفاده می‌کنیم که خود از عدد اسپالدینگ برای اعمال این اثرات استفاده می‌کند.

$$F_T(B_T) = (1 + B_T)^{0.7} \frac{\ln(1 + B_T)}{B_T} \quad (14)$$

عدد اسپالدینگ B_T در این معادله از رابطه (۱۵) به‌دست می‌آید.

$$B_T = \frac{c_{p,ref}(T_{\infty} - T_b)}{\Delta h_v} \quad (15)$$

برای بالانس حرارتی بین قطره، بخار ناشی از قطره و فاز پیوسته از رابطه (۱۶) استفاده می‌شود.

$$m_d(\partial h_i(T_d)/\partial t) + (\partial m_d/\partial t)h_i(T_d) = \dot{Q}_{\infty} + (\partial m_d/\partial t)h_v(T_b) \quad (16)$$

در رابطه فوق جمله‌ها به شکل زیرند:

۱- کل سمت چپ معادله برابر تغییر آنتالپی قطره است. جمله اول تغییر دما و جمله دوم آنتالپی از دست‌رفته قطره را بر اثر تغییر فاز نشان می‌دهد.

۲- متغیر اول سمت راست انتقال گرما از فاز پیوسته به بخار اطراف قطره را نشان می‌دهد.

۳- جمله دوم سمت راست آنتالپی گرفته‌شده توسط فاز پیوسته را بر اثر تغییر فاز نشان می‌دهد.

با اندکی تغییر معادله (۱۶) با توجه به فیزیک انتقال حرارت فاز پیوسته و گسسته به شکل (۱۷) در می‌آید.

$$\frac{\partial m_d}{\partial t} (h_i(T_d) - h_v(T_b)) = \dot{Q}_{\infty} + \dot{Q}_i \quad (17)$$

جمله دوم در سمت راست معادله (۱۷) بیانگر انرژی‌ای است که از قطره به سمت بخار ناشی از آن در هر گام زمانی

سرازیر می‌شود و برابر جمله اول در سمت چپ معادله انرژی در رابطه (۱۶) است. مزیت استفاده از این حالت معادله انرژی این

است که میزان این انرژی از روابط به‌دست می‌آید و می‌توان جمله چشمه انتقال انرژی به فاز پیوسته و همچنین تغییرات دمای

قطره را به‌دست آورد. تغییرات دمای قطره با رابطه (۱۸) به‌دست می‌آید.

$$\frac{\partial T_d}{\partial t} = - \frac{\dot{Q}_i}{m_d c_{p,l}} \quad (18)$$

میزان انرژی سرازیرشده از قطره به فاز پیوسته به دو جمله انرژی که در روابط (۱۹) و (۲۰) آورده شده قابل تفکیک

است. جمله اول انتقال حرارت لازم برای تبخیر آنی است، که توسط آداجی ارائه شده و از رابطه (۱۹) به‌دست می‌آید.

$$\dot{Q}_{i,sh} = \alpha_{sh} A (T_d - T_b) \quad (19)$$

جمله دوم در رابطه (۲۰) ارائه شده است که میزان آن منفی بوده و باید از نتیجه رابطه‌ی (۱۹) کم شود تا میزان انرژی

وارد شده به قطره حاصل شود. علت اعمال این انرژی منفی این است که مایع اولیه به‌خودی خود در حال خنک‌شدن است

(به‌علت فوق داغی) و آنتالپی آن از آنتالپی مایع در حال جوش بیشتر است. این میزان اختلاف با معادله (۲۰) محاسبه شده و

بایستی به صورت منفی در محاسبه انرژی ورودی به قطره اعمال شود.

$$\dot{Q}_{i,add} = \dot{m}_{res} (h_i(T_d) - h_l(T_b)) \quad (20)$$

که در نتیجه آن تغییر دمای قطره به صورت معادله (۲۱) به‌دست می‌آید.

$$\frac{dT_d}{dt} = (\dot{m}_{res}(T_d - T_b) - \dot{m}_{flash} \frac{\Delta h_v}{c_{p,l}}) \frac{1}{m_d} \quad (21)$$

قطر و پراکندگی قطرات

اتمیزاسیون مایع فوق داغ با مایع زیر سرد تفاوت دارد. در حالت زیر سرد (غیرآنی) اتمیزاسیون به دو فاز اولیه و ثانویه تقسیم می‌شود [۱۳]. در یک انژکتور فشاری پیچشی، در فاز اولیه، تفکیک ورقه مایع به چندین لخته^۱ انجام می‌شود. این تفکیک معمولاً در انژکتور پیچشی فشاری به وسیله مدل LISA^۲ (تحلیل ناپایداری صفحه مایع) انجام می‌شود. در این مدل [۱۴]، امواج موجود در ورقه مایع و تغییرات در طول این موج‌ها بررسی شده است. در حالت مایع فوق داغ لازم است که این مدل اصلاح شود. این اصلاحات در مطالعه وندروگ [۱۵] روی این انژکتور خاص با استفاده از نسبت فشار محیط به نسبت فشاری که مایع در دمای فعلی در آن در حالت اشباع قرار خواهد گرفت انجام می‌شود. در رابطه (۲۲) این تغییر اعمال می‌شود.

$$d = d_{LISA} \left(\frac{P}{P_{atm}} \right)^{0.27} \left[1 - X \left(\frac{P_{atm}}{P} \right)^{0.135} \right] \quad (22)$$

که در آن X میزان فوق داغی بی‌بعد است که مطابق معادله (۲۳) تعریف شده است. در این تعریف از مفاهیم انرژی داخلی (I) و حرارت نهان (I) تبخیر استفاده شده است.

$$X = \frac{I(T_p) - I(T_b)}{I(T_b)} \quad (23)$$

به‌طور کلی، مطالعات کامون و همکاران [۱۶] و کاوانو و همکاران [۱۷] نشان می‌دهد که اسپری ناشی از تبخیر آبی در یک انژکتور بادخانه ساده یک اسپری ریز با توزیع متمرکز و پراکندگی کم است. رمکه و همکاران در مطالعات خود روی پاشش تبخیر آبی نیتروژن [۱۸] و اکسیژن [۱۰] از یک پاشش با توزیع مدل روزین-راملر^۳ استفاده کرده‌اند. در این مطالعه، از پاشش مدل فشاری-پیچشی استفاده شده، اما با رابطه (۲۲)، که قبلاً عنوان شد، اصلاح می‌شود. همچنین، لازم است که زاویه پاشش نیز به‌عنوان شرط اولیه پاشش فراهم شود. با اعمال شرایط تبخیر آبی، زاویه پاشش یک اسپری بیشتر می‌شود. به‌طور مثال، در پژوهش ژائو [۱۹] نشان داده می‌شود که تبخیر آبی باعث اتمیزه‌شدن انفجاری قطرات می‌شود و یک جت ساده را به‌صورت یک مخروط در می‌آورد. این پدیده در شکل ۴ دیده می‌شود. زاویه مخروط پاشش با توجه به رابطه (۲۴) از بارکاهونی و لوی [۲۰] تعیین می‌شود.

$$\beta = \beta_n + (144 - \beta_n) Ja^2 \quad (24)$$

عدد ژاکوب در رابطه فوق (Ja) به‌وسیله رابطه (۲۵) تعیین می‌شود.

$$Ja = \frac{\rho_L C_{p,L} (T - T_{sat})}{\rho_v h_{fg}} \quad (25)$$

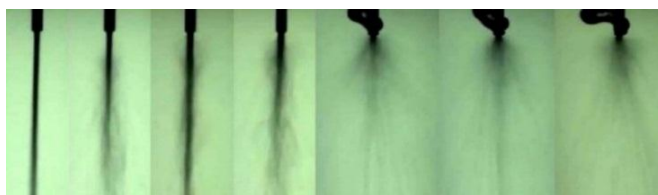


Figure 4- Widening of Spray Cone Angle due to Flashing

شکل ۴ - تغییر زاویه پاشش به‌علت تبخیر آبی

یکی دیگر از پارامترهای مهم در هنگام یافتن زاویه‌ها، زاویه پخش^۴ است. این زاویه، زاویه‌ای است که قطرات پس از شکسته‌شدن ورقه مایع و اتمیزاسیون با هم ایجاد می‌کنند. در شکل ۵، نمایی از این زاویه روی یک اسپری ناشی از انژکتور فشاری پیچشی دیده می‌شود.

1. Ligament
2. Linear Instability Sheet Atomisation
3. Rosin-Rammler
4. Dispersion Angle

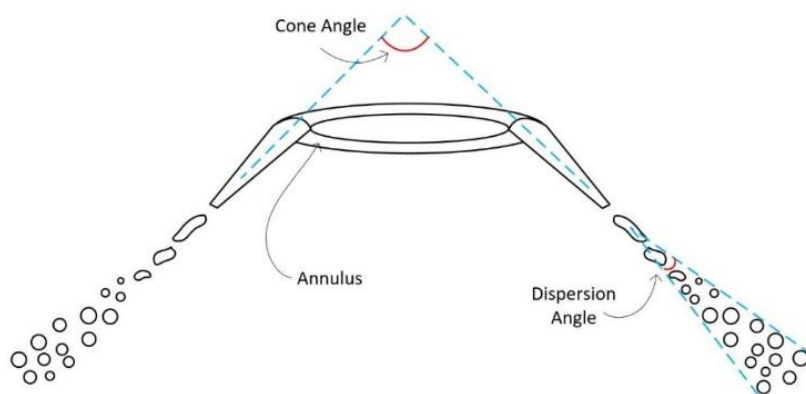


Figure 5- Dispersion Angle and Spray Cone Angle in an Annular Injector

شکل ۵- زاویه پخش و زاویه مخروط در یک انژکتور حلقوی

برای زاویه پخش در مطالعه اشمیت و همکاران [۲۱] بر روی اسپری در حالت تبخیر آبی عدد ۶ درجه انتخاب شده که در مدل اصلی از آن استفاده می‌شود.

بررسی مقیاس زمانی پدیده تبخیر آبی

برای روشن شدن بیشتر فیزیک مسئله تبخیر آبی، در این بخش سعی شده با اعمال روابط طرح شده فوق بر روی یک تک قطره در میدان نامحدود و در شرایط خاص (که در ادامه از همین شرایط برای اعتبارسنجی روش کار استفاده خواهد شد)، میزان تغییرات قطر قطره برحسب زمان به دست آورده شود تا مقیاس‌های زمانی تبخیر آبی و تبخیر غیرآبی به دست آید. برای تعریف یک مقیاس زمانی برای تبخیر آبی و غیرآبی دو راه وجود دارد.

۱- استفاده از ضریب انتقال جرمی و ضریب فوق داغی

در این رویکرد سعی می‌شود تا با استفاده از ضریب انتقال جرمی در حالت غیرآبی (k_c) و ضریب فوق داغی در حالت تبخیر آبی (α_{sh}) یک مقیاس زمانی با بعد زمان (واحد s) برای تبخیر قطره در میدان به دست آید. در زیر این مقیاس‌های به دست آمده برای حالت غیرآبی و آبی ارائه شده‌اند.

$$\Delta T_{non-flash} = \frac{D}{k_c} \quad (26)$$

$$\Delta T_{flash} = \frac{D \Delta h_w \rho}{\Delta T \alpha} \quad (27)$$

که در آن، D قطر قطره، Δh_w گرمای نهان تبخیر، ρ چگالی مایع و ΔT میزان فوق داغی است. با توجه به حضور متغیرهای زیاد، علاوه بر ضریب فوق داغی موجود در رابطه مربوط به مقیاس زمانی تبخیر آبی این روش مناسب به نظر نمی‌رسد.

۲- استفاده از رابطه تبخیر به‌طور مستقیم

در این روش، که اتخاذ شده از رابطه انتقال جرمی (دبی جرمی) است، زمان تبخیر کل قطره برای یک قطره مشخص در شرایط معینی به دست می‌آید. در این حالت، می‌توان رابطه‌ای به صورت رابطه (۲۸) برای این رویکرد نوشت.

$$\Delta T_{flash or non-flash} = \frac{m}{\dot{m}} \quad (28)$$

در ادامه، این شرایط خاص تعریف شده و این مقیاس‌ها به دست می‌آیند. در روش اول (تک‌قطره)، فرض خاص این مسئله رهاسازی یک تک‌قطره اکسیژن مایع در میدانی نامحدود از هواس. شرایط فاز پیوسته (محیط) در جدول ۱ آمده است. در ادامه و در جدول ۲، شرایط فاز گسسته (اکسیژن مایع) دیده می‌شود.

جدول ۱- شرایط فاز پیوسته در مسئله شناخت مقیاس زمانی

Table 1- Continuous Phase Conditions for Time Scale Identification

Property	Value
Fluid Type	Air
Temperature	90 K
Pressure	0.1 bar
Excess Oxygen Content	0% (constant)
Velocity	0 m/s

جدول ۲- شرایط فاز گسسته در مسئله مقیاس زمانی

Table 2- Discrete Phase Conditions for Time Scale Identification

Property	Value
Fluid Type	LOX
Temperature	90 K
Boiling Temperature @ 0.1 bar	72.8 K
Superheat	17.2 K
Droplet Diameter	16 μm
Droplet Density	0.428 kg/m ³
Droplet Velocity	20 m/s (constant)

در این مدل‌سازی، ساده‌سازی‌هایی صورت گرفته که در مدل عددی صحت‌سنجی و مدل عددی اصلی وجود ندارد. این ساده‌سازی‌ها عبارت‌اند از:

- سرعت قطره ثابت فرض شده که به معنای عدم در نظر گرفتن اثرات پسا و تکانه است.
- میزان اکسیژن موجود در فاز پیوسته با تبخیر اکسیژن قطره تغییری نمی‌کند که این فرض با در نظر گرفتن تک‌قطره و سرعت نسبتاً بالای آن نزدیک به واقعیت است.
- ضریب نفوذ جرمی با تغییرات حرارت قطره (حدود ۱۸ درجه در کل میدان) تغییری نمی‌کند.
- دما و فشار و کلیه ویژگی‌های فاز پیوسته بدون تغییر می‌ماند.

قبل از ارائه نتایج مدل‌سازی تک‌قطره مقیاس‌های زمانی مطرح می‌شود. با استفاده از معادلات بخش قبل مقادیر برای مقیاس زمانی در شروع پاشش به دست می‌آید. برای تبخیر آبی مقیاس زمانی برابر 4.256×10^{-5} ثانیه و برای تبخیر غیرآبی این مقدار برابر 4.6×10^{-4} ثانیه به دست می‌آید که این اعداد نسبت سرعت تبخیر آبی به غیرآبی را نشان می‌دهند. اگر برای یک قطره با شرایط فوق میزان سرعت تبخیر ثابت بوده و برابر میزان آن در ورودی باشد، تبخیر جرم قطره (برحسب kg) نسبت به زمان (برحسب s) مطابق شکل ۶ خواهد بود.

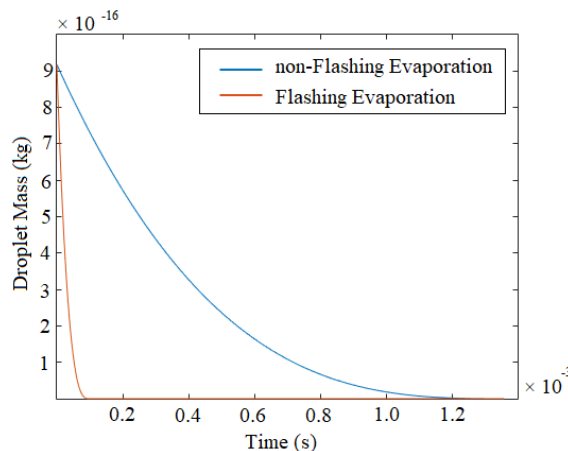


Figure 6- Time scales in Flashing and non-Flashing Conditions

شکل ۶- مقایسه مقیاس‌های زمانی در تبخیر آبی و غیرآبی

همچنین، برای تبخیر تک‌قطره برحسب زمان، با در نظر گرفتن هر دو نوع تبخیر، شکل ۷ ایجاد می‌شود.

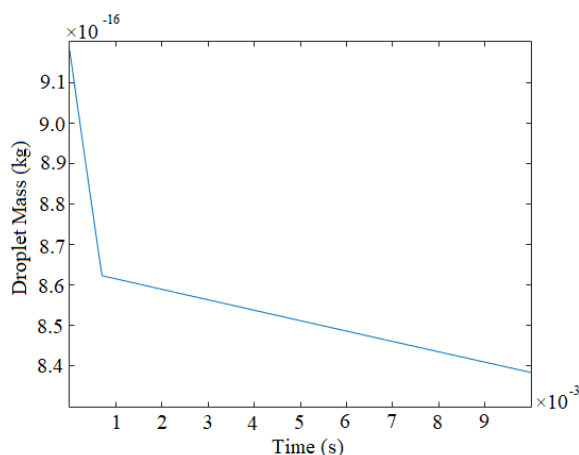


Figure 7- Droplet Evaporation Process during first 10 ms

شکل ۷- روند تبخیر تک قطره در ۱۰ میلی ثانیه اول

همان‌طور که مشاهده می‌شود بخشی که سرعت تبخیر بیشتری دارد مربوط به حالت آبی و بخش کندتر مربوط به حالتی است که در آن شرایط فوق‌داغی دیگر وجود نداشته و رسانش و همرفت عوامل موثر در تبخیرند.

صحه‌گذاری

همان‌طور که پیش از این عنوان شد، برای صحه‌گذاری روش مورد استفاده در این پژوهش از مطالعه رمکه و همکاران [۱۰] استفاده شده است. این مقاله داده‌های خود را با داده‌های تجربی DLR^۱ آلمان از مقالات منفلتی [۲۲] اعتبارسنجی کرده است. در این مقاله، از یک انژکتور با دهانه ساده دوپایه استفاده شده است که اکسیژن (اکسیدکننده در این مطالعه) از حفره مرکزی وارد میدان حل می‌شود. قطر این انژکتور ۲/۴ میلی‌متر است. سوخت مورد استفاده متان است که از قسمت حلقه‌ای انژکتور دوپایه وارد محفظه احتراق می‌شود که در این مطالعه بررسی خواهد شد. محفظه احتراق مورد استفاده، که میدان حل است، قطری برابر ۶۰ میلی‌متر دارد. قطر گلوگاه این محفظه احتراق برابر ۲۶/۶ میلی‌متر است. طول محفظه احتراق از محل انژکتور تا گلوگاه برابر ۱۳۸ میلی‌متر است. در ۱۰۰ میلی‌ثانیه اول در این مطالعه تنها اکسیدکننده وارد میدان حل می‌شود و خواص جریان در هر نقطه برای دو فاز پیوسته و گسسته مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شبکه مورد استفاده یک قطاع ۳۶ درجه است. شبکه اصلی مورد استفاده در این مطالعه یک شبکه ۱۲۰۰۰۰ سلولی شش‌وجهی است که در حوالی محل انژکتور و حوالی گلوگاه ریزتر و در طول محفظه احتراق درشت‌تر است. تعداد شبکه‌بندی در راستای مماسی برابر ۱۰ است و تعداد ۱۴ شبکه‌بندی در راستای شعاعی برای محل پاشش اکسیدکننده در نظر گرفته شده است. دمای اولیه و شرط مرزی دمای خروجی فشار مورد استفاده ۹۰ کلوین است. در لحظه پاشش سرعت گاز داخل انژکتور برابر صفر بوده و در سکون کامل است. فشار مورد مطالعه برابر ۰/۱ بار است که یک دهم فشار استاندارد اتمسفر است. در این فشار میزان دمای اشباع اکسیژن برابر با ۷۲/۷ کلوین است که این میزان فوق‌داغی برابر با ۱۷/۳ کلوین را نشان می‌دهد. شرایط پاشش در جدول ۳ به اختصار آورده شده است.

ذکر این نکته لازم است که در روابط مربوط به آلفای فوق‌داغی یک ضریب تصحیح وارد شده است. مطالعه اصلی مربوط به آداجی و مایع مورد استفاده پنتان است. برای استفاده از این رابطه برای به‌دست‌آوردن فوق‌داغی موثر برای اکسیژن مایع، رابطه (۲۹) اعمال شده است [۱۰]. در این معادله، مخرج کسر سمت راست دمای تبخیر نرمال برای هر ماده است.

$$\frac{\Delta T}{T_{b,n,C_5H_{12}}} = \frac{\Delta T_{eff,O_2}}{T_{b,n,O_2}} \quad (29)$$

جدول ۳- مشخصه‌های پاشش در اعتبارسنجی

Table 3- Injection Properties in Verification of Method

Property	Value
Injection Type	Solid Cone
Injection Material	LOX
Injection Velocity	20 m/s
Injection Distribution Model	Rosin - Rammler
Min Diameter (μm)	10
Max Diameter (μm)	20
Mean Diameter (μm)	16
n_{spread}	8
Particle per Parcel Release Method	Constant
No. of Particle per Parcel	100
Injection Mass Flow	55 g/s
Injection Temperature	90 K
Spray Angle	50 deg

در نمودارهای شکل ۸، نتایج صحنه‌گذاری روش مورد استفاده برای فشار، دمای قطرات و میزان فوق داغی قطرات در طول محور در لحظه ۱۰۰ میلی‌ثانیه آورده شده است. مشاهده می‌شود که فشار محیط پیوسته و دمای قطرات فاز گسسته تطبیق خوبی با نتایج رمکه و همکارانش دارند. در قسمت مربوط به مقایسه نتایج فوق داغی، به‌علت اینکه خطای حاصل از دمای قطرات و دمای اشباع در فشار (که خود دارای خطاست) با هم جمع شده‌اند، خطای بیشتری مورد انتظار بود که این موضوع در نمودار سمت راست شکل ۸ مشاهده می‌شود. با تمام این وجود خطای همه این مقادیر در سطحی مطلوب بوده که تأییدی بر صحت روش مورد استفاده در مطالعه حاضر است.

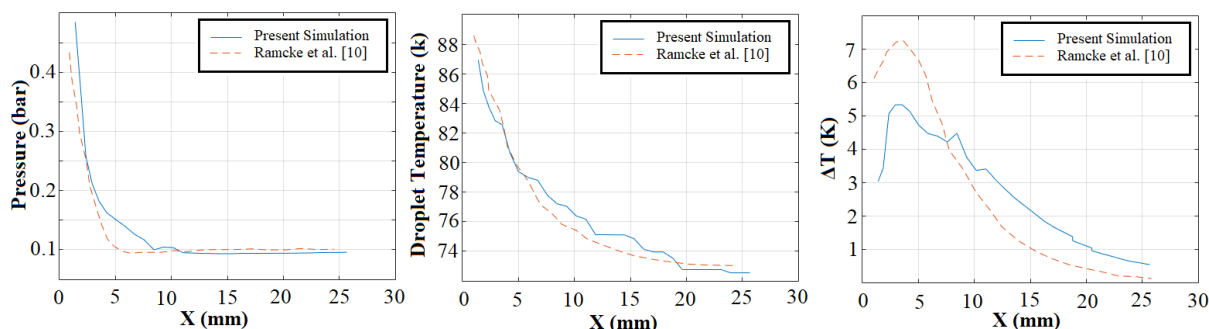


Figure 8- Results of Verification

شکل ۸- نتایج صحنه‌گذاری

نتایج

در مدل‌سازی این بخش از هندسه محفظه احتراق رانشگر مربوط به پژوهشگاه فضایی ایران استفاده شده است. در شکل ۹، قطر محفظه، قطر دیواره بیرونی انژکتور هم‌محور و فاصله گلوگاه تا انتهای دهانه انژکتور فشاری پیچشی مورد استفاده به‌صورت ضربی از قطر گلوگاه (T) دیده می‌شوند. مایع اکسیدکننده (دی‌نیتروژن تترا اکسید یا ^1NTO) از انژکتور هم‌محور پاشش می‌شود و شبکه مورد استفاده دارای 109000 سلول است.

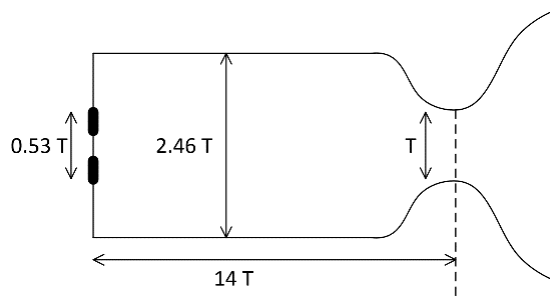


Figure 9- Parametric Dimensions of Combustion Chamber
 شکل ۹- ابعاد پارامتری محفظه احتراق مورد استفاده

در این شبکه‌بندی، که تصویر کلی آن در شکل ۱۰ دیده می‌شود، از سلول‌های شش‌وجهی استفاده شده است. در اطراف محل قرارگیری دهانه انژکتور و محل گلوگاه ریزسازی شبکه انجام شده است.

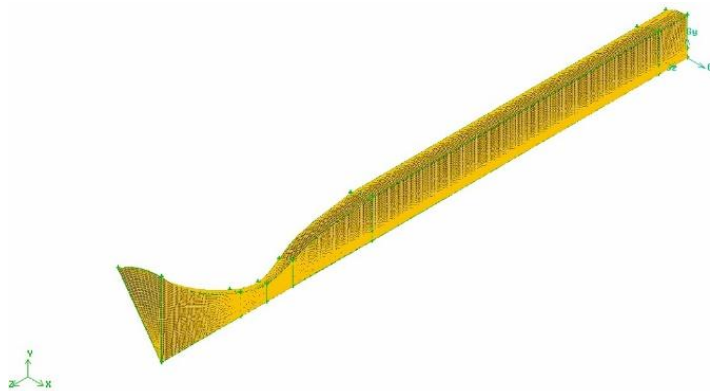


Figure 10- Meshing of Combustion Chamber
 شکل ۱۰- شبکه‌بندی مورد استفاده برای محفظه احتراق

شرایط اولیه میدان حل شامل سرعت صفر و دمای ۲۸۰ درجه کلوین است. پاشش با نرخ ۳ گرم بر ثانیه انجام می‌شود و فشار بالادست انژکتور نیز در این مطالعه برابر ۱۵ بار است. دمای قطرات برابر ۳۰۰ درجه کلوین است و فشار محیط محفظه احتراق ۰/۲ بار است. با اجرای برنامه کامپیوتری طراحی‌شده، مشخص می‌شود که پس از حدود ۲۰ میلی‌ثانیه نتایج فاز گسسته و پیوسته به حالت پایا می‌رسند. نتایج حاصل از این مدل‌سازی در دو بخش نتایج فاز گسسته و نتایج فاز پیوسته ارائه می‌شود.

شرایط مرزی میدان حل شامل فشار خروجی ۰/۲ بار و دمای ۲۸۰ کلوین در خروجی است. دیواره‌ها عایق با شرط برخورد بازگشت^۱ قطرات فاز گسسته است. پاشش دی‌نیتروژن تتروکسید در محفظه با آهنگ ۳ گرم بر ثانیه، با فشار ۱۶ بار از انژکتور استاندارد فشاری-پیچشی انجام می‌شود. دمای قطرات ۳۰۰ کلوین است.

مطالعه شبکه

علاوه بر شبکه‌بندی‌ای که در بخش قبل مطرح شد دو شبکه دیگر یکی بزرگ‌تر و دیگری کوچک‌تر برای هندسه محفظه احتراق ساخته شد. شبکه بزرگ‌تر ۱۵۲۰۰۰ سلولی و شبکه کوچک‌تر ۵۶۰۰۰ سلولی است. در ادامه مقایسه این نتایج را روی شکل

1. Rebound

۱۱ دیده می‌شود. شکل ۱۱، از چپ به راست، نتیجه بررسی بیشینه سرعت در محفظه، دما در گلوگاه و بیشینه فشار در محفظه را در سه شبکه‌بندی تولیدشده نشان می‌دهد.

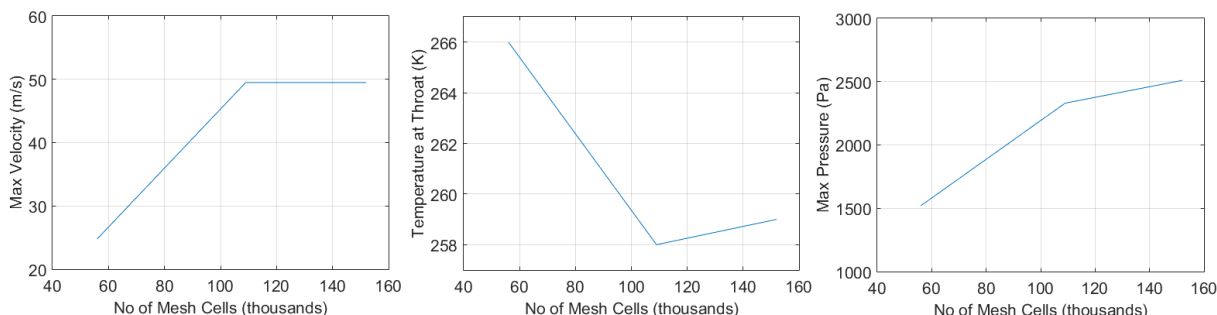


Figure 11- Mesh Independence Study
شکل ۱۱- نتایج مطالعه استقلال از شبکه

همان‌طور که دیده شد، نتایج دو شبکه بزرگ‌تر بسیار به هم نزدیک بوده که این نشان می‌دهد استقلال از شبکه در جایی در میان ۵۶۰۰۰ سلول و ۱۰۹۰۰۰ سلول حاصل می‌شود. مدل اصلی در این مطالعه از شبکه ۱۰۹۰۰۰ سلولی استفاده کرده است و این مطالعه در محدوده امن استقلال شبکه قرار می‌گیرد.

نتایج فاز گسسته

نتایج تغییرات زمانی قطر قطرات خروجی از انژکتور در نمودار شکل ۱۲ نشان داده شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که قطرهای میانگین عددی قطرات خروجی حدوداً پس از ۶ میلی‌ثانیه در شرایط پایا قرار می‌گیرند، در حالی که قطر کمینه از لحظه ۳ میلی‌ثانیه و قطر بیشینه از لحظه ۱۵ میلی‌ثانیه روندی ثابت پیدا می‌کنند.

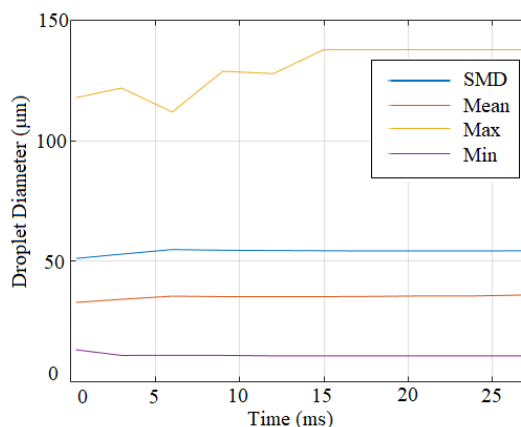


Figure 12- Temporal Variation of Droplet Diameter at Nozzle Exit
شکل ۱۲- تغییرات زمانی قطر قطرات خروجی از انژکتور

نمودار شکل ۱۲ بیانگر مشخصه مربوط به قطر مجموعه قطرات اسپری در هر لحظه زمانی است که در این راستا، توسعه اسپری قطرات در داخل محفظه در ۵ لحظه زمانی مختلف به‌همراه کانتور اندازه این قطرات در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مطابق این شکل و براساس موقعیت قطرات در محفظه و نیز مقیاس کانتور اندازه قطرات می‌توان مشاهده کرد که اسپری با گذشت زمان ضمن پرکردن فضای محفظه به‌سمت شرایطی پایا حرکت می‌کند.

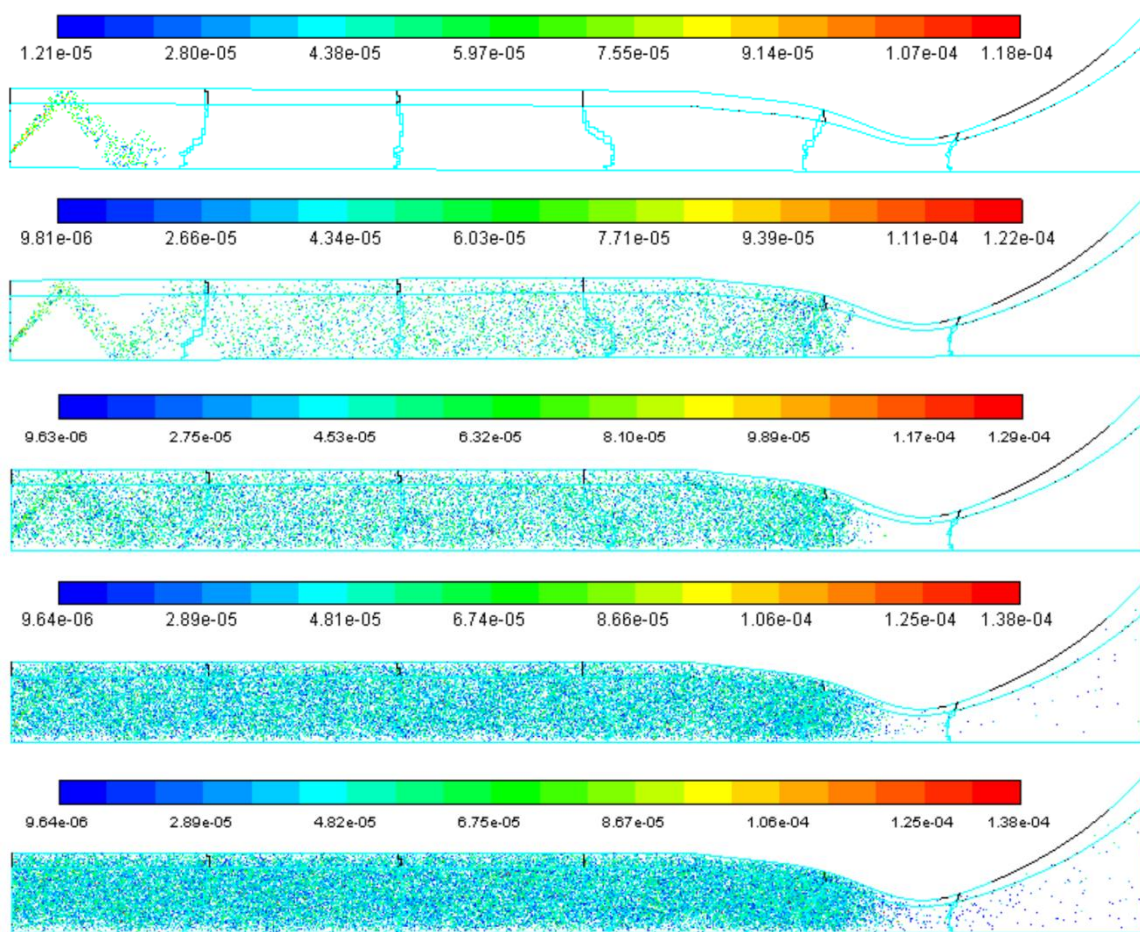


Figure 13- Temporal Development of Spray Droplets within Chamber with Diameter Contours (in m) at 0.3, 3, 9, 18 & 27 ms
 شکل ۱۳- توسعه زمانی اسپری قطرات در محفظه به همراه کانتور قطر قطرات (برحسب متر) در لحظات ۰/۳، ۰/۹، ۰/۱۸ و ۰/۲۷ میلی ثانیه

تغییرات مکانی دمای میانگین قطرات در راستای محور محفظه برای زمان ۰/۳ میلی ثانیه در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

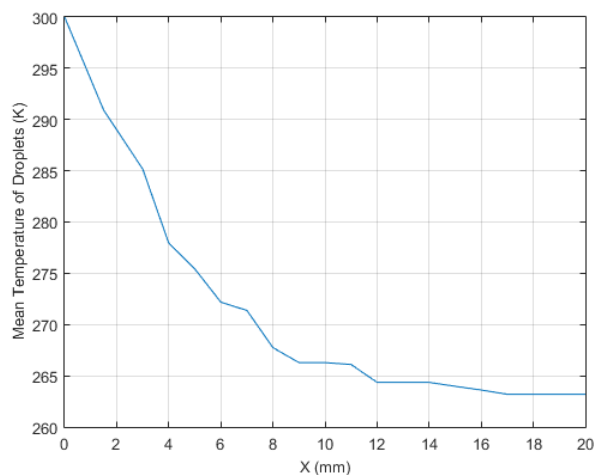


Figure 14- Droplet Temperature along the Chamber Axis at 0.3 ms
 شکل ۱۴- دمای میانگین قطرات خروجی در طول محور محفظه در ۰/۳ میلی ثانیه

در این شکل مشاهده می‌شود که دمای میانگین قطرات در این لحظه دارای روندی کاهشی در طول محفظه است. این روند، که در ابتدا با شیب کاهشی تندی در اثر تبخیر آبی مواجه شده، پس از حدود ۹ میلی‌متر، با تغییر فرایند تبخیر آبی به تبخیر عادی قطره، از شیب کاهشی ملایمی برخوردار می‌شود. متناظر با شکل ۱۳، کانتور دمایی قطرات برای توسعه مکانی قطرات در محفظه در لحظات زمانی مختلف در شکل ۱۵ نشان داده شده است. این شکل نیز نشان می‌دهد که اسپری قطرات با گذشت زمان علاوه بر پرکردن فضای محفظه به سمت شرایط دمایی پایا پیش می‌رود. در این راستا، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که میانگین قطر و دمای قطرات از لحظه زمانی ۲۰ میلی ثانیه به بعد در شرایط پایا قرار می‌گیرند.

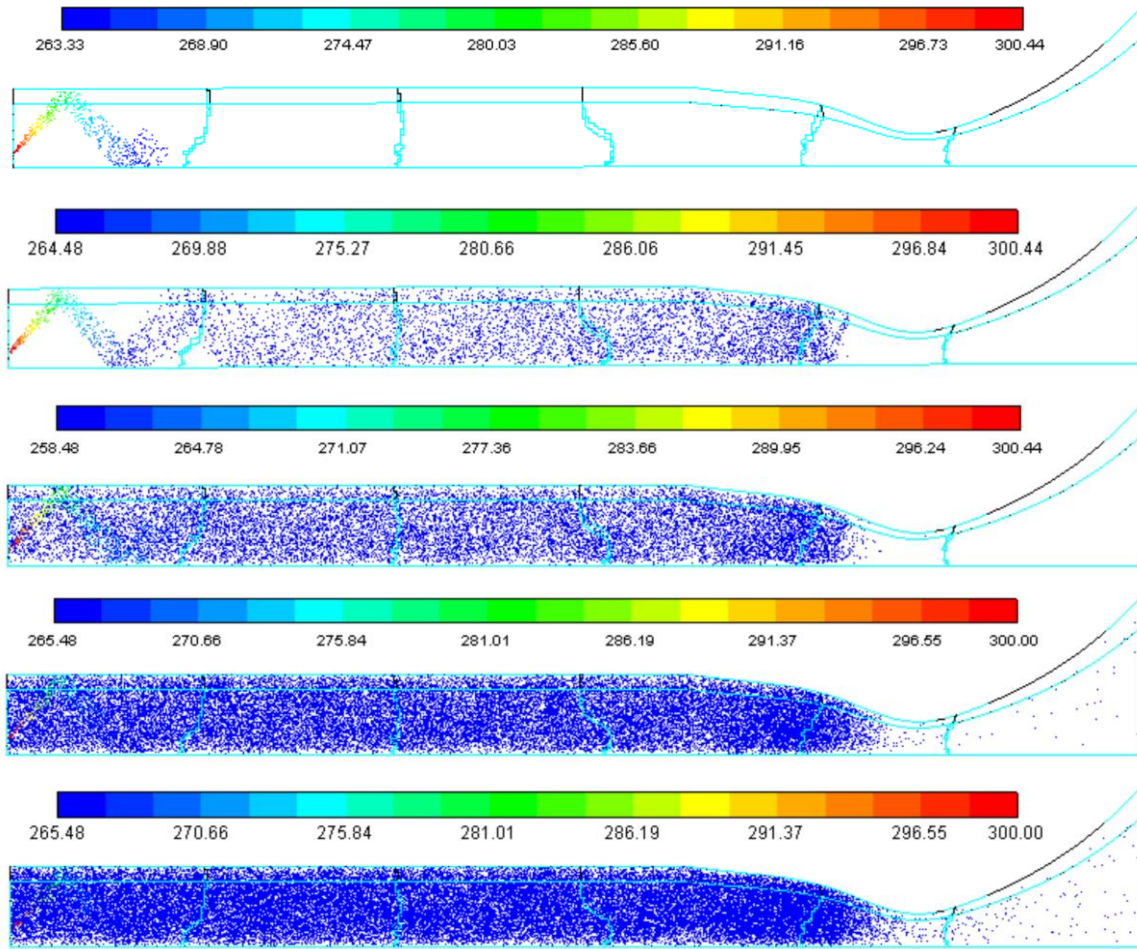


Figure 15- Temporal Development of Spray Droplets within Chamber with Temperature Contours (in K) at 0.3, 3, 9, 18 & 27 ms
 شکل ۱۵- توسعه زمانی اسپری قطرات در محفظه به همراه کانتور دمای قطرات (برحسب کلوین) در لحظات ۰/۳، ۳، ۹، ۱۸ و ۲۷ میلی ثانیه

نتایج فاز پیوسته

تغییرات زمانی فشار نسبی بیشینه مربوط به فاز پیوسته بر روی محور محفظه در شکل ۱۶ نشان داده شده است. مطابق این شکل، پس از لحظه ۱۵ میلی‌ثانیه می‌توان شرایط ثابتی را برای فشار بیشینه به میزان ۷ کیلوپاسکال شاهد بود. تغییرات فشار نسبی فاز پیوسته در امتداد محور محفظه و در لحظات زمانی مختلف در شکل ۱۷ نشان داده شده است. در شکل ۱۷، مشاهده می‌شود که سطح فشار در محفظه احتراق با گذشت زمان افزایش یافته و در نهایت در حدود ۲۰ میلی‌ثانیه به پایداری می‌رسد که بیشینه آن قدری کمتر از ۶ کیلوپاسکال است.

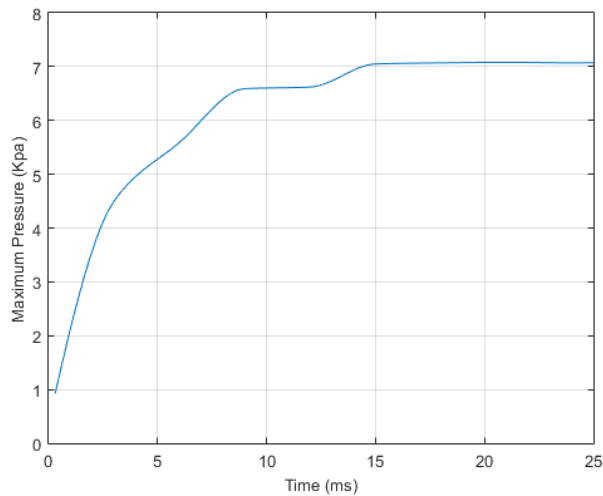


Figure 16- Temporal Variation of Continuum Phase Maximum Pressure on Chamber Axis

شکل ۱۶- تغییرات زمانی فشار بیشینه فاز پیوسته بر روی محور محفظه

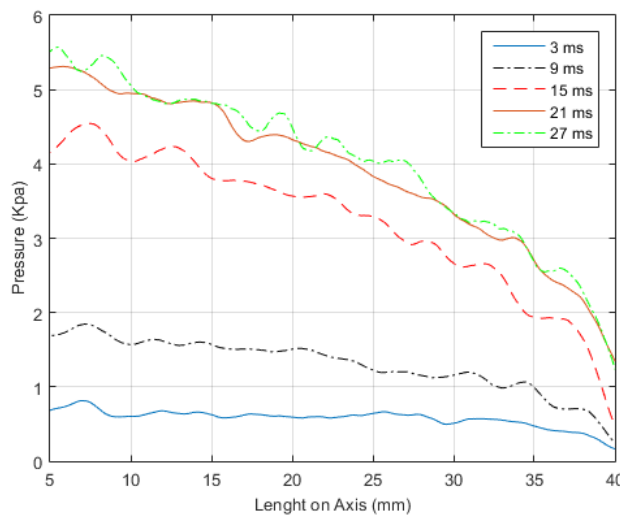


Figure 17- Variation of Continuum Phase Pressure along Chamber Axis at various instants

شکل ۱۷- تغییرات فشار فاز پیوسته در خط محور محفظه در زمان‌های مختلف

شکل ۱۸ کانتورهای مربوط به فشار فاز پیوسته را در فضای محفظه و در لحظات زمانی مختلف نشان می‌دهد. مطابق این شکل، هر چند فشار نسبی محفظه با گذشت زمان در نواحی ابتدایی محفظه و نزدیک به انژکتور افزایش می‌یابد ولی تغییر محسوسی در نواحی انتهایی محفظه و در اطراف گلوگاه پدید نمی‌آید.

دمای فاز پیوسته هم مانند فاز گسسته (شکل ۱۴) در طول زمان کاهش می‌یابد که این موضوع در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود. با توجه به دمای اولیه فازها که ۲۸۰ کلوین است، دما در حالت پایا برای فاز پیوسته همراه با فاز گسسته به حدود ۲۶۴ درجه کلوین می‌رسد. شکل ۲۰ کانتورهای مربوط به دمای فاز پیوسته را در فضای محفظه و در لحظات زمانی مختلف نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان کاهش دمای محفظه را با گذشت زمان در اثر توسعه پروفیل دمایی از سمت انژکتور به سمت گلوگاه ملاحظه کرد که نهایتاً به شرایط دمایی نسبتاً ثابتی در محفظه منتهی می‌شود.

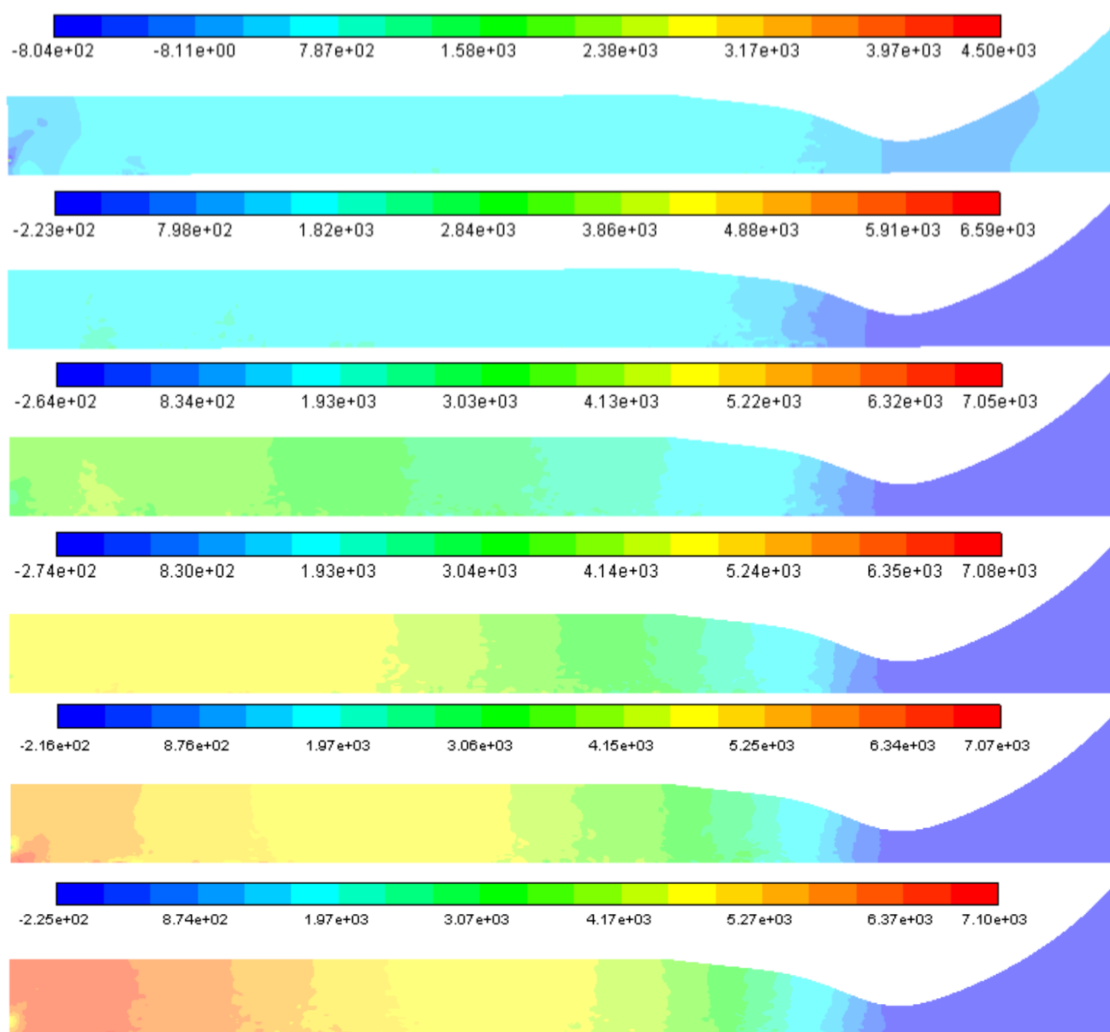


Figure 18- Continuum Phase Pressure Contours (in Pa) in Chamber at 3, 9, 15, 21, 24 & 27 ms
 شکل ۱۸- کانتور فشار فاز پیوسته (برحسب پاسکال) در محفظه در لحظات زمانی ۳، ۹، ۱۵، ۲۱، ۲۴ و ۲۷

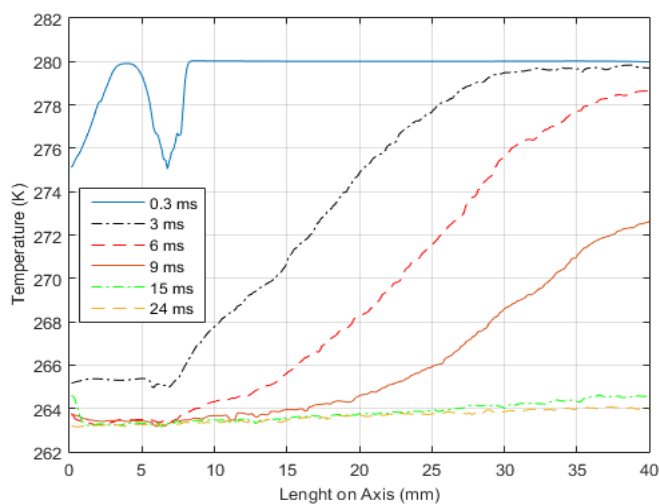


Figure 19- Variation of Continuum Phase Temperature (in K) along Chamber at Different Instants
 شکل ۱۹- تغییرات دمای فاز پیوسته در خط محور محفظه در زمان های مختلف

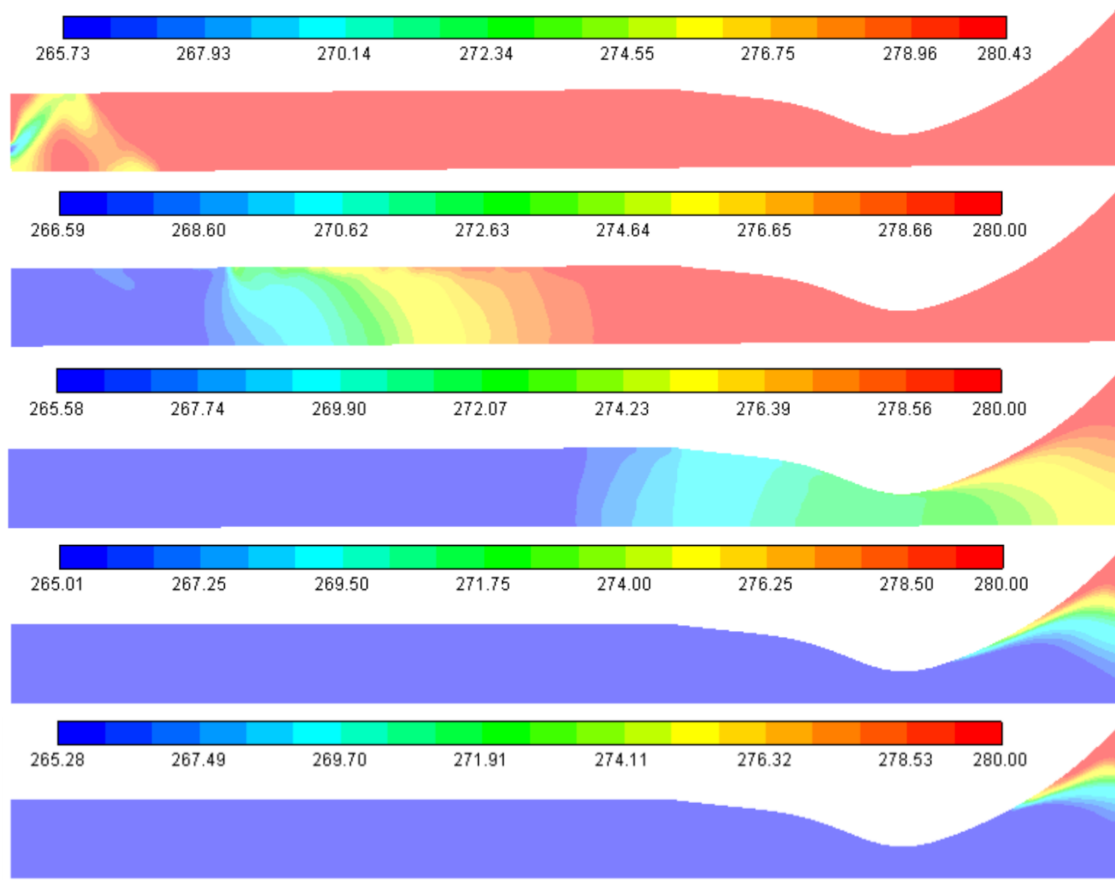


Figure 20- Continuum Phase Temperature Contours (in K) in Chamber at 0.3, 3, 9, 18 & 27ms
 شکل ۲۰- کانتور دمای فاز پیوسته (برحسب کلوین) در محفظه در لحظات زمانی ۰/۳، ۳، ۹، ۱۸ و ۲۷ میلی‌ثانیه

در لحظه ۰/۳ میلی‌ثانیه اسپری قطرات از انژکتور تازه شروع شده و فرایند تبخیر آبی در حال گرفتن حرارت از فاز پیوسته و همچنین خود قطرات است. مقیاس زمانی انتقال حرارت به قطرات در جهت شعاعی در این لحظه کوچک‌تر از مقیاس زمانی انتقال حرارت و اختلاط گاز سرد شده و گرم است. به همین دلیل، مشاهده می‌شود که در این لحظه گاز فاز پیوسته حول قطرات سرد شده، ولی انتقال گرما و همچنین اختلاط گاز سرد و گرم هنوز صورت نگرفته است. بنابراین، مسیری که در کانتور دمای فاز پیوسته در این لحظه مشاهده می‌شود همان مسیر قطرات است. در لحظات بعد، اختلاط گاز سرد و گرم در جهت شعاعی کامل می‌شود و چشمه سرد، که همان پدیده تبخیر آبی در قسمت ابتدای محفظه است، انتقال حرارت در جهت شعاعی را کامل کرده است. اکنون، تنها انتقال حرارت در جهت محوری بررسی می‌شود که همان‌طور که نشان داده شده، این انتقال حرارت نیز در حدود ۲۰ میلی‌ثانیه به حالت پایا می‌رسد.

در شکل ۲۱، برای درک بیشتر کاهش دما در محفظه، تغییرات دمای نقطه گلوگاه در طول زمان نشان داده شده است. دمای گلوگاه از دمای اولیه (۲۸۰ کلوین) در لحظات ابتدایی با شیبی کم و پس از آن با شیبی تند کاهش یافته و نهایتاً به دمای پایدار ۲۶۴ کلوین می‌رسد. فاصله زمانی اولیه که از زمان صفر تا شروع کاهش تند دما وجود دارد به علت فاصله هندسی محل تبخیر آبی و گلوگاه است.

همچنین، شایان ذکر است که در اثر تبخیر قطرات، فشار محفظه بالا رفته و این موجب افزایش سرعت خروجی فاز پیوسته از محفظه می‌شود. بیشینه این سرعت خروجی در گلوگاه پس از حدود ۲۰ میلی‌ثانیه مطابق شکل ۲۲ به حالت پایدار و به مقداری بیش از ۴۰ متر بر ثانیه می‌رسد.

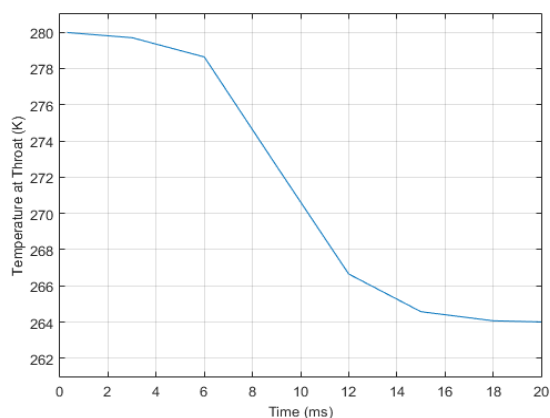


Figure 21- Temporal Variation of Continuum Phase Temperature at Throat

شکل ۲۱- تغییرات زمانی دمای فاز پیوسته در گلوگاه

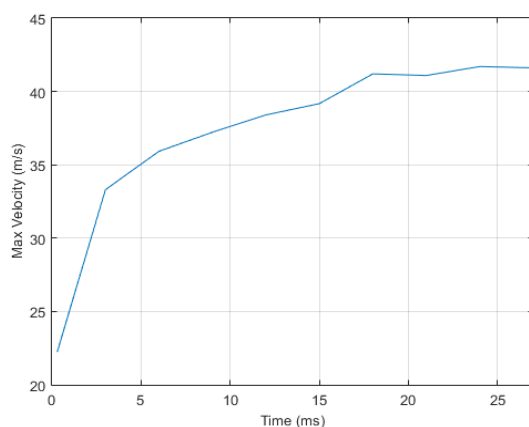


Figure 22- Temporal Variation of Continuum Phase Maximum Velocity at Throat

شکل ۲۲- روند تغییرات زمانی سرعت بیشینه فاز پیوسته در گلوگاه

شکل ۲۳ تغییرات زمانی سرعت فاز پیوسته را بر روی محور محفظه و در موقعیت محوری ۱۲T نشان می‌دهد. نکته جالب توجه در این شکل کاهش نوسانات سرعت در طول زمان پس از روند صعودی-نزولی آن و رسیدن به مقدار ثابتی از لحظه حدود ۱۲ میلی‌ثانیه به بعد است که حاکی از حرکت فاز پیوسته به سمت شرایط پایا است.

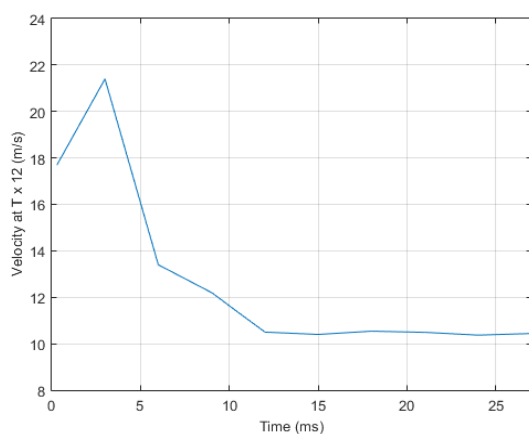


Figure 23- Temporal Variation of Continuum Phase Velocity on Chamber Axis at 12T Axial Position

شکل ۲۳- روند تغییرات زمانی سرعت فاز پیوسته بر روی محور محفظه در موقعیت طولی ۱۲T

شکل ۲۴ کانتورهای مربوط به سرعت فاز پیوسته را در فضای محفظه و در لحظات زمانی مختلف نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان کاهش سرعت فاز پیوسته را در فضای محفظه همزمان با افزایش سرعت در گلوگاه شاهد بود که با گذشت زمان و توسعه فاز پیوسته در محفظه به سمت شرایط پایا میل می‌کند.

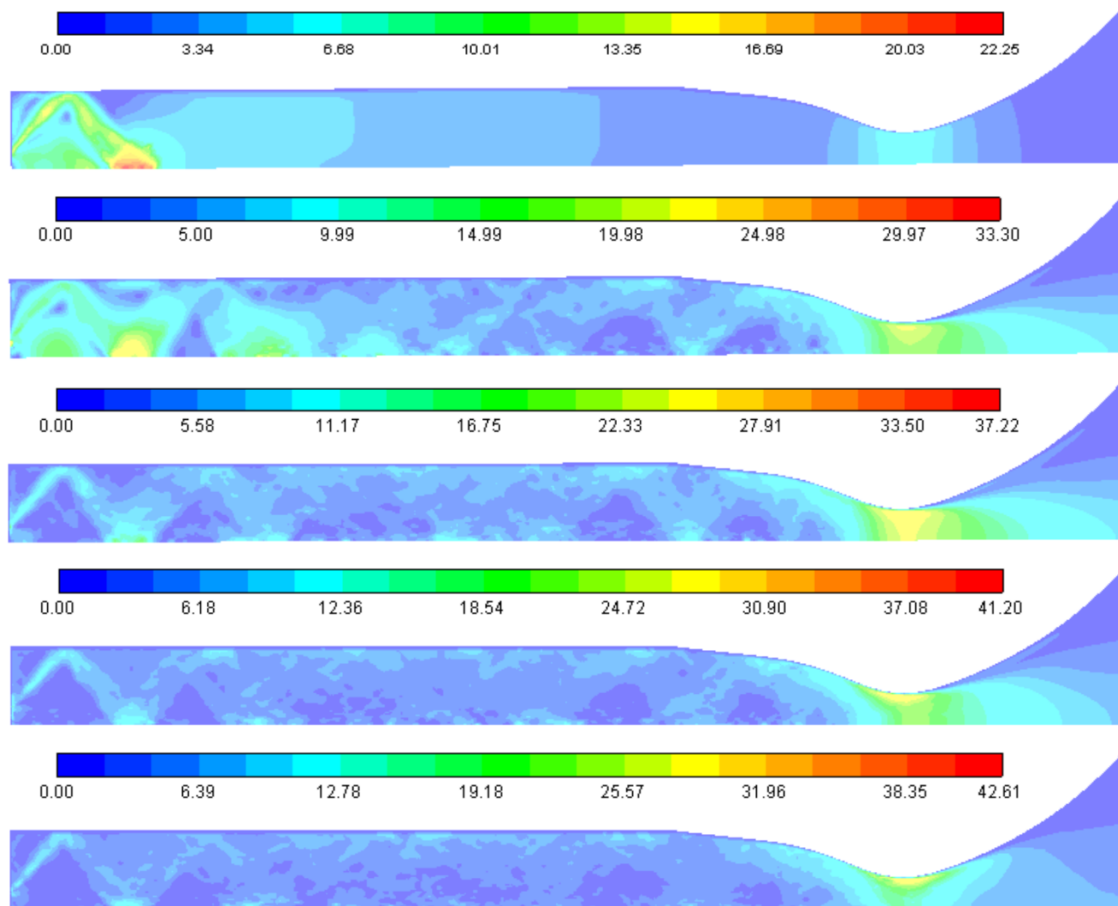


Figure 24- Continuum Phase Velocity Contours (in m/s) in Chamber at 0.3, 3, 9, 18, 27 ms

شکل ۲۴- کانتور سرعت فاز پیوسته (برحسب متر بر ثانیه) در محفظه در لحظات زمانی ۰/۳، ۰/۹، ۰/۱۸ و ۰/۲۷ میلی‌ثانیه

پدیده‌ای که موجب ایجاد سرعت در گلوگاه می‌شود افزایش فشار محفظه احتراق به دلیل تبخیر اکسنده است. در لحظه ۰/۳ میلی‌ثانیه فرایند تبخیر آبی تازه شروع شده و میزان گاز تولیدشده ناشی از تبخیر آبی ناچیز است و به همین دلیل بیشینه سرعت در گلوگاه نیست. از طرفی، به دلیل برهمکنش تکانه میان قطرات اکسنده (که در بدو ورود سرعت دارند) و گاز محیط پیوسته و همچنین بخار ناشی از تبخیر، این فاز سرعت می‌گیرد که در لحظات بعدی نیز قابل رویت است. اما، به دلیل غلبه سرعت در گلوگاه بر این سرعت (به دلیل افزایش فشار محفظه) سرعت این فاز با وضوح کمتری دیده می‌شود، هرچند میزان آن تغییر چندانی ندارد.

نتیجه‌گیری

تبخیر قطرات پاشش‌شده به یک محفظه براساس وقوع پدیده تبخیر آبی به روش عددی و برپایه جریان دو فازی گاز-مایع شبیه‌سازی و مطالعه شد. صه‌گذاری روش شبیه‌سازی در مقایسه با نتایج عددی سایر محققان نشان می‌دهد که روش مورد استفاده در این پژوهش از نظر تعیین کمی و کیفی فشار و دمای قطرات از قابلیت بسیار خوبی برخوردار است که این قابلیت

برای تخمین فوق داغی قطرات نیز به‌ویژه با دور شدن از موقعیت انژکتور صادق است. تاثیر فرایند تبخیر آبی بر تغییر اندازه قطرات اسپری ضمن اینکه شرایط پایایی را با گذشت زمان کوتاهی از آغاز تبخیر برای قطرهای میانگین و کمینه نشان می‌دهد ولی به حداقل سه برابر این مدت زمان برای تثبیت قطر بیشینه قطرات نیاز است. روند تبخیر قطرات حاکی از شیب تند کاهشی در دمای میانگین قطرات در راستای محور طولی محفظه و در اثر وقوع تبخیر آبی است که با نزدیک شدن به گلوگاه محفظه از تاثیر این نوع تبخیر به‌شدت کاسته شده و روند تبخیر عادی قطرات با کاهشی ملایم در تغییر دما به‌وقوع می‌پیوندد. توسعه زمانی اسپری نیز نشان می‌دهد که قطرات مایع با گذشت زمان ضمن پر کردن فضای محفظه به‌سوی ایجاد شرایط پایداری پیش می‌روند، به‌طوری که پس از حدود ۲۰ میلی‌ثانیه می‌توان دستیابی به شرایط پایا را برپایه تثبیت قطر و دمای قطرات مشاهده کرد. بررسی جریان گاز به‌عنوان فاز پیوسته نیز نشان می‌دهد که فشار بیشینه این فاز پس از حدود ۱۵ ثانیه به مقدار ثابت ۷ کیلوپاسکال می‌رسد. با این حال، تغییرات فشار نسبی فاز پیوسته در راستای محور محفظه حاکی از افزایش این فشار با گذشت زمان است، به‌طوری که تثبیت و پایداری آن به زمانی بیشتر در حدود ۲۰ میلی‌ثانیه نیاز دارد. این افزایش فشار نسبی با گذر زمان عمدتاً در موقعیت‌های مجاور انژکتور اتفاق می‌افتد، در حالی که با نزدیک شدن به انتهای محفظه و در مجاورت گلوگاه از میزان این افزایش فشار به مقدار قابل توجهی کاسته می‌شود. تغییرات زمانی دمای فاز پیوسته نیز همانند فاز گسسته قطرات از روندی کاهشی تا رسیدن به مقدرای پایدار تبعیت می‌کند، که این کاهش دما در هر دو فاز گسسته و پیوسته در نهایت به دمای یکسانی در حدود ۲۶۴ کلوین منتهی می‌شود. افزایش فشار در فاز پیوسته در اثر تبخیر قطرات، همچنین، موجب افزایش سرعت خروجی فاز پیوسته از گلوگاه محفظه می‌شود که همزمان با کاهش سرعت این فاز در فضای محفظه است.

منابع

1. "ESA official website" [Online], Available: <https://www.esa.int/>, Accessed: 16 Sep 2020.
2. AstroRecon, "Small Satellite Propulsion," 2015. [Online], Available: www.lpi.usra.edu, Accessed: 16-Sep-2020.
3. R. Schmehl and J. Steelant, "Flash-evaporation of oxidizer spray during start-up of a spacecraft engine in vacuum," *9th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS*, Sorrento, Italy, 2003.
4. Y. Liao and D. Lucas, "Computational modelling of flash boiling flows: A literature survey," *Int. J. Heat Mass Transf.*, 111, 2017, pp. 246–265.
5. R. D. Reitz, "A Photographic Study of Flash-Boiling Atomization," *Aerosol Sci. Technol.*, 12, No. 3, 1990, pp. 561–569.
6. M. Adachi, V. G. McDonell, D. Tanaka, J. Senda and H. Fujimoto, "Characterization of fuel vapor concentration inside a flash boiling spray," *SAE Technical Paper No. 970871*, 1997.
7. B. Zuo, A. M. Gomes and C. J. Rutland, "Modelling superheated fuel sprays and vapourization," *Int. J. Engine Res.*, 1, No. 4, 2000, pp. 321–336.
8. J. Steelant and R. Schmehl, "Computational Modelling of the Preflow Phase during Start-Up of an Upper-Stage Rocket Engine," in *Fifth European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles*, Cologne, Germany 2005.
9. R. Schmehl and J. Steelant, "Computational analysis of the oxidizer preflow in an upper-stage rocket engine," *J. Propuls. Power*, 25, No. 3, 2009, pp. 771–782.
10. T. Ramcke, A. Lampmann and M. Pfitzner, "Simulations of Injection of Liquid Oxygen/Gaseous Methane Under Flashing Conditions," *J. Propuls. Power*, 34, No. 2, 2017, pp. 395–407.
11. S. A. J. Morsi and A. J. Alexander, "An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems," *J. Fluid Mech.*, 55, No. 2, 1972, pp. 193–208.
12. J. D. Schwarzkopf, M. Sommerfeld, C. T. Crowe and Y. Tsuji, *Multiphase flows with droplets and particles*, CRC press, USA, 2011.
13. A. Lefebvre and V. G. McDonell, *Atomization and Sprays*, 2nd ed., CRC press, USA, 2017.
14. P. K. Senecal, D. P. Schmidt, I. Nouar, C. J. Rutland, R. D. Reitz and M. L. Corradini, "Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization," *Int. J. Multiph. Flow*, 25, No. 6, 1999, pp. 1073–1097.
15. B. A. VanDerWege and S. Hochgreb, "Effects of fuel volatility and operating conditions on fuel sprays in DISI engines: (1) imaging investigation," *SAE Technical Paper 2000-01-0535*, 2000.

16. H. Kamoun, G. Lamanna, B. Weigand, S. Saengkaew, G. Grehan, and J. Steelant, "Temperature and Droplet Size Measurements in a Flashing Ethanol Jet Using the Global Rainbow Thermometry," *The Proceedings of ILASS Europe*, Chania, Crete, 2013, pp. 1-4.
17. D. Kawano, Y. Goto, M. Odaka, and J. Senda, "Modeling atomization and vaporization processes of flash-boiling spray," SAE Technical Paper No. 2004-01-0534, 2004.
18. T. Ramcke and M. Pfitzner, "Numerical simulations of atomization and flash evaporation of cryogenic nitrogen injection," *ICHMT Digital Library Online*, DOI: 10.1615/ICHMT.2015.THMT-15.1310, pp. 603-606, 2015.
19. W. F. Du, K. Li, S. Wang and J. F. Zhao, "Flashing liquid jets in low-pressure environment," *Interfacial Phenom. Heat Transf.*, 1, No. 2, 2013, pp. 173-180.
20. T. Bar-Kohany and M. Levy, "State of the art review of flash-boiling atomization," *At. Sprays*, 26, No. 12, 2016, pp. 1259-1305.
21. D. P. Schmidt, M. L. Corradini and C. J. Rutland, "A two-dimensional, non-equilibrium model of flashing nozzle flow," *3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference*, San Francisco, California, US, 1999.
22. C. Manfletti, "Laser ignition of an experimental cryogenic reaction and control thruster: pre-ignition conditions," *J. Propuls. Power*, 30, No. 4, 2014, pp. 925-933.

English Abstract

Evaporation of injected oxidizer from a pressure-swirl injector in a low pressure combustion chamber

Roozbeh Khodaverdian^{1*}, Mohammad Reza Morad², Mohammad Reza Jahannama³, Ali Reza Ramezani⁴ and Azadeh Kebriaee⁵

1- MSc Graduate, Dept of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, roozbehkhodaverdian@alum.sharif.edu

2- Associate Professor, Dept of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran morad@sharif.ir

3- Assistant Professor, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran, m.jahannama@isrc.ac.ir

4- MSc Graduate, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran, ramezani_a@alum.sharif.edu

5- Assistant Professor, Dept of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, kebriaee@sharif.edu

*Corresponding author

(Received: 2020.09.29, Received in revised form: 2020.12.30, Accepted: 2021.02.07)

In this study, the evaporation of liquid oxidizer inside a combustion chamber during engine start-up in a low-pressure environment is numerically investigated. In thruster starting stage, first, a portion of oxidizer which has been evaporated inside the injector capillaries fills the void inside the combustion chamber and causes a pressure rise (up to 0.2 bars). This makes the injection of oxidizer as fluid possible and now the evaporation rate can be investigated. In the investigated thruster the mass flow of injected liquid is 3 grams per second and the type of injector is pressure-swirl. Numerical simulation in this study is based on an Eulerian-Lagrangian method known as Discrete Phase Method (DPM), which investigates the interaction of two phases using Navier-Stokes Equations. A verification is done to support the results of the method used in order to obtain quantitative variables essential to this study. The tendency of fluids to reach a stable state after an abrupt process of flashing is visible in the results of this study. After a small period of time around 20 milliseconds a stable temperature around 264 kelvins is reached which causes a stable pressure of 7 kPa in the combustion chamber.

Keywords: Flash evaporation, Combustion chamber, Hypergolic Oxidizer, Pressure-Swirl injector, Transient thermal numerical simulation