

بررسی اثر پدیده شبه جوشش در اختلاط یک جت برشی گذر-بحرانی واکنشی و غیر-واکنشی

محمد فرشچی

استاد- دانشکده هوافضا-دانشگاه صنعتی شریف
farshchi@sharif.edu

حامد زینی وند

دانشجوی دکتری- دانشکده هوافضا-دانشگاه صنعتی شریف
Zeinivand_hamed@ae.sharif.edu

چکیده

در مقاله حاضر اختلاط در شرایط واکنشی و غیر-واکنشی یک جریان برش محوری گذر-بحرانی مورد بررسی قرار گرفته است. محفظه احتراق RCM03 مبنای شبیه سازی و صحنه گذاری مدل سازی بوده است. نتایج حاصل از مدل سازی با داد های تجربی معتبر موجود تطابق مناسبی دارد. در حالی که جریان برشی محوری غیر واکنشی می باشد یک جریان برشی محوری قوی در اثر اختلاف سرعت زیاد بین دو جت سوخت و اکسنده ایجاد می شود که سبب اختلاط بسیار سریع بین دو جریان و همچنین انتقال حرارت بالا در اثر بالا بودن هدایت حرارتی آشفنگی بین هیدروژن دما بالا با اکسیژن دما پایین می شود. در شرایط واکنشی اما یک انبساط ناگهانی در اثر پدیده شبه جوشش در داخل شعله ایجاد می شود که باعث می شود جت هیدروژن به سمت دیواره منحرف بشود و در نتیجه ویسکوزیته آشفته در ناحیه برشی که محل انتقال جرم و انرژی بین دو جریان می باشد کاهش یابد و در نتیجه میزان انتقال حرارت به هسته اکسیژن کاهش می یابد و جت اکسیژن در شرایط مایع مانند فاصله بیشتری را در محفظه نفوذ می کند و دیرتر خط Widom را رد کرده و وارد فاز گاز مانند می شود.

کلمات کلیدی: احتراق گذر-بحرانی- پدیده شبه جوشش- اختلاط- جریان برشی محوری

مقدمه

احتراق سوخت (و یا اکسنده) در شرایط فوق بحرانی (ترمودینامیکی) یکی از موارد مهم سیستمهای کاربردی امروزی می باشد. یکی از دلایل افزایش مفاهیم فوق بحرانی، نیاز به توسعه سیستمهای احتراقی فشار بالا، مانند موتورهای سوخت مایع، توربینهای گاز و موتورهای احتراق داخلی و PDE می باشد [1,2]. هنگام رسیدن قطرات سوخت (و یا اکسنده) به محفظه احتراق، فرآیندهای متوالی مانند تبخیر، اختلاط، اشتعال و احتراق در فشارهای بالاتر از شرایط نقطه بحرانی صورت می گیرد. در این شرایط سوخت وارد شده (عموماً) به لحاظ دمایی پایین تر از نقطه بحرانی و به لحاظ فشاری بالاتر از نقطه بحرانی قرار دارد. این شرایط به نام گذر-بحرانی شناخته می شود. با افزایش دمای مایع به بالاتر از دمای بحرانی، سیال به صورت کامل در شرایط فرابحرانی قرار می گیرد. در این حالت سیال رفتار متفاوتی از خود نشان می دهد. به عبارت دیگر در این حالت، نفوذ سیال مانند گازها ولی چگالی آن به مایع نزدیک می باشد. همچنین خواص حلالیت سیال نیز دچار تغییر می شود و به تغییرات فشار وابسته می شود. در این حالت قابلیت حل شدن فاز رقیق در فاز چگال به شدت افزایش می یابد [3]. از دیگر موارد مهم مشخصات غیر عادی خواص انتقال و ترمودینامیکی مانند ظرفیت جذب حرارتی، هدایت حرارتی، ویسکوزیته و ... می باشد. در شرایط فرابحرانی کشش سطحی از بین می رود (آنالتالی تبخیر از بین می رود) و ظرفیت گرمایی سیال به صورت ناگهانی چند برابر می شود. به دلیل از بین رفتن کشش سطحی

در احتراق فوق بحرانی، تبخیر به عنوان کنترل کننده سرعت واکنش شناخته نمی شود و به جای آن به دلیل لایه ای شدن جریان (به دلیل اختلاف چگالی بالای بین جت و ناحیه اطراف) اختلاط نسبت به سینتیک سرعت کمتری دارد و در نتیجه اختلاط کنترل کننده فرآیند می باشد. در حوزه احتراق فوق بحرانی با توجه به نیاز سیستمهای پیشران سوخت مایع، بیشتر تحقیقات در مورد فوق بحرانی مربوط به پروپلنتهای اکسیژن مایع و هیدروژن مایع (و یا گازی شکل) می باشد. مجموعه تست استندهای خانواده RCM و همچنین Mascotte در مجموعه ONERA بیشترین و معتبرترین داده های تجربی فوق بحرانی را ارائه کردند [4-6]. اسمیت و همکارانش [7] به صورت تجربی یک جریان محوری واکنشی فرا-بحرانی هیدروژن گازی-اکسیژن مایع را مورد بررسی قرار داده اند. وجه تمایز محفظه احتراق مورد مطالعه آنها با محفظه احتراق Masscot وجود یک جریان محوری داخلی هیدروژن برای خنک کاری دیواره محفظه احتراق می باشد که در شرایط جریان نیز تاثیر گذار است و این موضوع در نتیجه آنها نیز مورد اشاره قرار گرفته است. مطالعات آنها برای دو دمای مختلف ورودی هیدروژن می باشد. آنها داد های مربوط به دو فاصله محوری ۵۰ و ۸۰ میلیمتری از انژکتور را چندین بار اندازه گیری کرده اند. در فاصله محوری ۵۰ میلیمتری ۴ نقطه و در فاصله ۸۰ میلیمتری ۵ نقطه به عنوان نقاط اندازه گیری تعیین شده است. نکته قابل توجه در اندازه گیری ها وجود رفتار شدید بایمودال در تاریخچه دماهای اندازه گیری شده در فاصله ۸۰ میلیمتری می باشد. آنها اشاره کرده اند که این رفتار بایمودال می تواند حاصل برهمکنش و ترکیب چندین نوع پدیده شامل اثر جریان هیدروژن خنک کاری، اغتشاشات شدید یک شعله آشفته و در نهایت نوسانات هسته جریان با چگالی بالا اکسیژن باشد. نوسانات جت اکسیژن مایع توسط میر و تمورا [8] نیز گزارش شده است و آنها از این نوسان به عنوان ناپایداری هلیکال یاد کرده اند. ضخامت لایه برشی و ناحیه واکنش در امتداد محور و در اثر کوپل شدن احتراق آشفته با ناپایداری هلیکال هسته LOX، افزایش پیدا می کند. کیم و همکارانش به تازگی از مدل احتراقی فلیملت برای شبیه سازی مشخصات جریان آشفته گذر بحرانی متان گازی-اکسیژن مایع و هیدروژن گازی-اکسیژن مایع استفاده کرده اند. آنها نشان داده اند که پدیده هایی مانند چرخش جریان داخل شعله، تغییر حجم ناگهانی و همچنین کوتاه شدن شعله ناشی از وجود پدیده شبه جوشش در شعله گذر-بحرانی می باشد. در سیستمهای پیشران کرایوژنیک حداقل یکی از واکنش دهنده ها در شرایط مایع مانند (زیر دمای بحرانی) وارد محفظه احتراق می شود. در واقع سیستمهای پیشران کرایوژنیک در شرایط گذر-بحرانی عمل می کنند و نه در شرایط کاملاً بحرانی. در سیستمهای پیشران سوخت مایع فشار محفظه در محدوده ۱۰ مگاپاسکال قرار دارد که می تواند تا ۴۰ مگاپاسکال نیز افزایش یابد که بسیار بیشتر از فشار بحرانی اکسیژن (۵ مگاپاسکال) می باشد. در شرایط فشار فوق بحرانی و دمای زیر بحرانی در حین افزایش دما یک افزایش ناگهانی در ظرفیت حرارتی ویژه سیال ایجاد می شود. به دمایی که ماکزیمم ظرفیت حرارتی اتفاق می افتد دمای شبه بحرانی می گویند.

معادلات حاکم

یک جریان واکنشی حالت پایا به صورت معادلات میانگین گیری شده فلور و به صورت زیر بیان می شود [14].

پیوستگی

$$\frac{\partial \tilde{\rho} \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{\rho} \langle u_j \rangle \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = \frac{\partial \tilde{\rho} \langle u_j'' u_i'' \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{\tau}_{ij}}{\partial x_i} + \tilde{\rho} g_j \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tilde{\rho} \langle h \rangle \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = - \frac{\partial \tilde{\rho} \langle h'' u_i'' \rangle}{\partial x_i} + \frac{D \tilde{p}}{Dt} - \frac{\partial \tilde{J}_i^z}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + q_i + q_r \quad (3)$$

$$\frac{\partial \tilde{\rho} \langle Y_z \rangle \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = - \frac{\partial \tilde{\rho} \langle Y_z'' u_i'' \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial \tilde{J}_i^z}{\partial x_i} + \mathcal{K}_z \quad (4)$$

از مدل standard k-ε برای شبیه سازی اثر آشفته‌گی استفاده شده است [15]. مدل standard k-ε نسبت به دیگر مدل‌های RANS اختلاط را در جت‌ها بیشتر پیش بینی می‌کند. از آنجا که در جریان‌های گذر-بحرانی اختلاط سریعتر از جریان‌های مادون-بحرانی صورت می‌گیرد، این مدل برای شرایط گذر-بحرانی مناسب تر می‌باشد. در این مدل از دو معادله انتقال برای محاسبه ترم‌های تولید انرژی جنبشی و نرخ اضمحلال آن و در نهایت ویسکوزیته آشفته‌گی استفاده می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\tilde{\rho} k \tilde{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \tilde{\rho} \varepsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\tilde{\rho} \varepsilon \tilde{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \tilde{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

ویسکوزیته آشفته‌گی همگن، μ_t توسط رابطه زیر داده می‌شود.

$$\mu_t = \tilde{\rho} C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

در نهایت ترم تنش‌های رینولدز در معادله انتقال مومنتم از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\tilde{\rho} \langle u_i'' u_j'' \rangle = -\mu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} \tilde{\rho} k \quad (8)$$

مدل احتراقی

برای مدل‌سازی احتراق از مدل مشهور EDC که توسعه یافته مدل اضمحلال ادی‌ها می‌باشد استفاده شده است. [16] مدل EDC یک مدل با رویکرد جزئیات احتراق در جریان آشفته می‌باشد. فرض این مدل بر این اساس استوار می‌باشد که واکنش در ساختارهای کوچک آشفته‌گی به نام مقیاس-های کوچک انجام می‌شود. مقیاس طولی ساختارهای کوچک به صورت زیر محاسبه می‌شود.

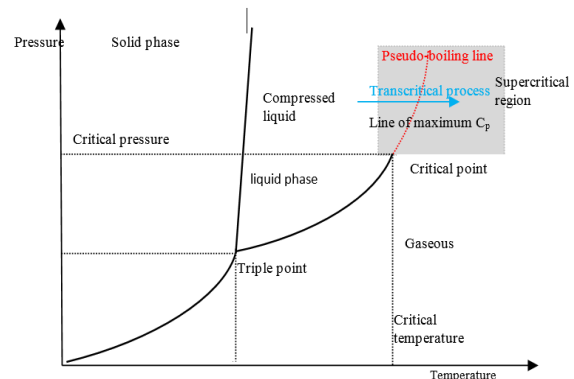
$$\xi = 2.1377 \left(\frac{\nu \varepsilon}{k^2} \right)^{1/4} \quad (9)$$

همچنین مقیاس زمانی انجام واکنش در ساختارها به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\tau = 0.4082 \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2} \quad (10)$$

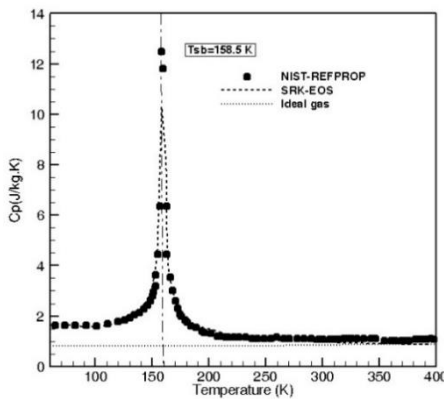
کاهش می‌یابد.

در این دما همچنین سیال دچار یک تغییر حجم شدید و ناگهانی نیز می‌شود که در یک محفظه احتراق می‌تواند بسیار تاثیر گذار باشد. نکته قابل توجه در این می‌باشد که با افزایش یک مقدار اندکی دما میزان چگالی به شدت کاهش می‌یابد. این پدیده به اصطلاح "شبه جوشش" نامیده می‌شود. هو و همکارانش [9] رفتار مدل‌های مختلف احتراقی (از جمله مدل فیلیمت) را در شبیه سازی جریان واکنشی فرابحرانی متان-اکسیژن مورد بررسی قرار داده‌اند. برای احتراق اکسیژن-هیدروژن امکان استفاده از سینتیک کامل می‌باشد (برای مثال زنجیره واکنشی با ۱۰ جزء و ۴۰ واکنش شیمیایی) ولی برای احتراق اکسیژن/هیدروکربن‌ها (به ویژه هیدروکربن‌های سنگین مانند کروزین) که دارای صدها جزء و هزاران واکنش شیمیایی می‌باشد امکان استفاده از سینتیک وجود ندارد. رنیز و سل [10] به صورت عددی (روش حل مستقیم) اثر یک اسپلیتر بر رفتار جریان سرد و گرم هیدروژن و اکسیژن در شرایط فرابحرانی را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آنها در مورد تاثیر در مقیاس بزرگ و مقیاس کوچک اسپلیتر قابل توجه می‌باشد. در حالت جریان سرد، در حالت فرابحرانی به دلیل اختلاف و گرادیان چگالی بین دو جریان اکسیژن (به عنوان جریان چگالی بالا) و هیدروژن (به عنوان جریان چگالی پایین) یک ناحیه با گرادیان بالا چگالی ایجاد می‌شود که اسپلیتر هم به لحاظ مقیاس بزرگ و هم به لحاظ مقیاس کوچک بر ساختار این ناحیه اثر قابل توجه می‌گذارد. یک رفتار ویژه سیال در شرایط فوق بحرانی زمانی رخ می‌دهد که با افزایش در یک بازه محدود دمایی در مجاور دمای شبه جوشش (برای فشار مشخص) که با خط قرمز در شکل (۱) نشان داده شده است، ظرفیت حرارتی به بیشترین مقدار خود میرسد. در مجاورت دمای شبه جوشش سیال فوق بحرانی مانند یک مایع با چگالی بالا رفتار می‌کند وقتی که دما از دمای شبه جوشش کمتر است و در حالی که دما از دمای شبه جوشش بیشتر است رفتارش گاز مانند می‌شود. در تمام این تغییرات رفتاری کشش سطحی وجود ندارد و جریان تک فاز می‌باشد. بانوتی و همکارانش [11-13] در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی پدیده شبه جوشش در جریان گذر-بحرانی انجام داده‌اند و نشان داده‌اند که در جریان گذر-بحرانی، اختلاط غالباً به صورت نفوذ صورت می‌گیرد که در آن خواص ترموفیزیکی به صورت تابعی غیر خطی از فشار موضعی و دما می‌باشند. در مقاله حاضر جریان گذر-بحرانی واکنشی و غیر-واکنشی هیدروژن-اکسیژن مایع مورد بررسی قرار گرفته است و نقش پدیده شبه جوشش در اختلاط متفاوت جریان واکنشی و غیر-واکنشی و در نهایت رفتار غیر منتظره دو جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

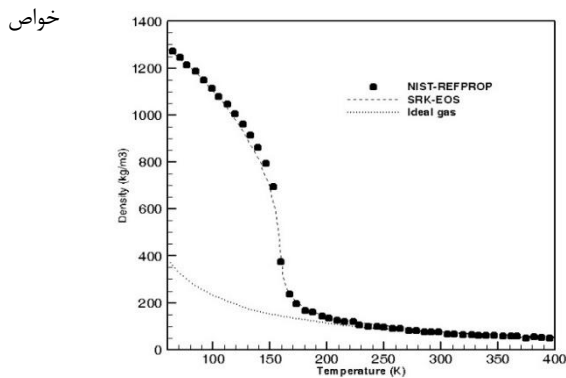


شکل ۱: شرایط گذر بحرانی در دمای شبه جوشش در دیاگرام فازی

دمای شبه بحرانی اکسیژن و در شرایطی که سیال در شرایط گذر-بحرانی قرار دارد اختلاف بین داده های NIST با شرایط گاز ایده آل فاصله بسیاری دارد و در دماهای بالاتر از بحرانی به داده های گاز ایده آل نزدیک می شود. با این حال در بیشتر دماها داده های مدل SRK با داده های NIST همخوانی نسبتاً مناسبی دارد و به همین دلیل از این مدل می توان برای محاسبه خواص ترمودینامیکی در شرایط فوق بحرانی استفاده کرد. نکته قابل توجه در این قسمت تغییرات شدید خواص ترمودینامیکی شامل چگالی و ظرفیت حرارتی در مجاورت دمای شبه جوشش با تغییرات اندک دما می باشد. همانطور که مشاهده می شود با رسیدن دما به محدوده ۱۵۸٫۵ کلوین ظرفیت حرارتی ویژه به شدت افزایش می یابد. در عین حال مشاهده می شود به همراه این تغییرات، چگالی نیز در یک بازه دمایی کوچک به شدت افت می کند و به عبارت دیگر حجم مخصوص سیال در این شرایط به شدت افزایش پیدا می کند. این تغییرات شامل ظرفیت حرارتی و به مهم تر از آن افزایش حجم شرایط جدیدی را در محفظه احتراق ایجاد می کند که نیاز است مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۲: خواص



ترمودینامیکی گاز ایده آل-مدل SRK و داده های NIST-ظرفیت حرارتی ویژه(بالا)- چگالی (پایین)

خواص انتقال در جریان واکنشی فرا-بحرانی

همانند خواص ترمودینامیکی برای خواص انتقال نیز لازم است تا اثر شرایط فرا-بحرانی را بر مخلوط اعمال کرد. رویکرد برای شرایط گاز واقعی در مورد ویسکوزیته بیشتر بر پایه نتایج چانگ و همکارانش [20] که بر اساس تئوری چاپمن-انسکوگ می باشد. این تئوری اصلاحات برای گازهای رقیق فرموله شده است اما برای فشار-بالا نیز توسعه داده شده است. برای مخلوطهای فشار بالا (گاز واقعی)، ویسکوزیته η به صورت زیر نوشته می شود.

در این حالت فرض می شود که در هر ساختار احتراق به صورت فشار ثابت و مانند یک راکتور همگن انجام می شود. برای کاهش حجم محاسبات از الگوریتم ISAT استفاده شده است تا سرعت حل تا ۲٫۵ برابر افزایش پیدا کند. نرخ انجام واکنش برای هر جزء به صورت زیر محاسبه می شود.

$$R_i = \frac{\rho \xi^2}{\tau [1 - \xi^2]} (Y_{i,\tau} - Y_i) \quad (11)$$

در رابطه فوق $Y_{i,\tau}$ کسر جرمی جزء i در ساختار مورد نظر پس از زمان τ می باشد. در شبیه سازی حاضر با توجه به شرایط فشاری محفظه احتراق از مکانیزم پیشنهادی لی و همکارانش [17] استفاده شده است که شامل ۱۳ جزء شیمیایی و ۲۵ واکنش می باشد و برای احتراق هیدروژن-اکسیژن در فشار بالا ارائه شده است.

معادله حالت

با توجه به اینکه در حالت فرا-بحرانی مشخصات مربوط خواص ترمودینامیکی از حالت گاز ایده آل پیروی نمی کند در اینجا از مدل SRK برای اعمال اثر شرایط فرا-بحرانی بر چگالی مخلوط استفاده شده است. مدل Soave-Rdelich-Kwong (SRK) یکی از مدل‌های معروف جهت محاسبه مشخصات ترمودینامیکی (چگالی) در شرایط فرا-بحرانی می باشد. معادله cubic این مدل به صورت زیر معرفی می شود [18]

$$p = \frac{R_u T}{V-b} - \frac{a(T)}{V^2 + bV} \quad (12)$$

که در آن R_u ثابت جهانی گاز، $V = M/\rho$ حجم مولی می باشد که در آن M وزن مولکولی می باشد.

حجم موثر مولکول، b ، از رابطه $b = 0.0866 R_u T_{cr} / p_{cr}$ محاسبه می شود که در رابطه فوق T_{cr} بیان کننده نقطه بحرانی می باشد. برهمکنش بین مولکولی به صورت زیر داده می شود.

$$a(T) = a_0 [1 + n(1 - (T/T_c)^{0.5})]^2 \quad (13)$$

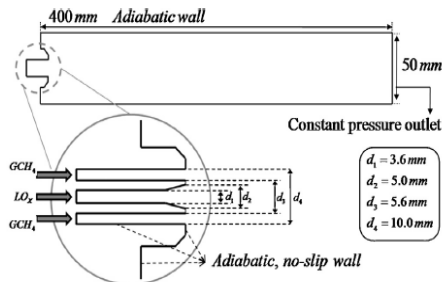
که در آن $a_0 = 0.4275 R_u^2 T_{cr}^2 / p_{cr}$ و $n = 0.480 + 1.57 \omega_i - 0.176 \omega_i^2$ ضریب استنتریک می باشد.

خواص ترمودینامیکی می تواند به صورت مستقیم از روابط زیر استخراج شود.

$$\begin{aligned} e(T, \rho) &= e_0(T) + \int_{\rho_0}^{\rho} \left[\frac{P}{\rho^2} - \frac{T}{\rho^2} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{\rho} \right] d\rho \\ h(T, P) &= h_0(T) + \int_{\rho_0}^{\rho} \left[\frac{1}{\rho} + \frac{T}{\rho^2} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{\rho} \right] dP \\ s(T, \rho) &= s_0(T, \rho_0) - \int_{\rho_0}^{\rho} \left[\frac{T}{\rho^2} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{\rho} \right] d\rho \\ C_V(T, \rho) &= C_{V0}(T) - \int_{\rho_0}^{\rho} \left[\frac{T}{\rho^2} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{\rho} \right] d\rho \\ &\quad + \frac{T}{\rho^2} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{\rho}^2 / \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{\rho} \end{aligned} \quad (14)$$

در شکل (۲) مقایسه بین داده های NIST، [19] مدل SRK و شرایط گاز

به خروج اکسیژن، دارای قطر داخلی 3.6 mm و قطر خارجی 5 mm است که با زاویه 8 درجه به هم متصل شده اند. هیدروژن به صورت هم‌محور با اکسیژن، از ورودی حلقوی با قطر داخلی 5 mm و قطر خارجی 10 mm وارد محفظه می‌شود. شرایط عملکردی A-60 در جدول 1 بیان شده است. فشار محفظه برابر با 6 Mpa است که از فشار بحرانی اکسیژن 5.04 Mpa بیشتر می‌باشد، درحالی‌که دمای اکسیژن 85K می‌باشد که از دمای بحرانی اکسیژن (154.6 K) کمتر است. به عبارت دیگر اکسیژن با شرایط گذر-بحرانی وارد محفظه احتراق می‌شود در حالی‌که هیدروژن درحالت فوق‌بحرانی به محفظه پاشیده می‌شود.



شکل 4: شکل شماتیک محفظه و ابعاد هندسی

برای اعمال شرط مرزی ورودی هیدروژن و اکسیژن، از شرط دبی جرمی استفاده شده است. تمامی دیواره‌های محفظه، با استفاده از شرط عدم لغزش و به‌صورت آدیاباتیک اعمال شده است. برای شرط مرزی خروجی از شرط Pressure Outlet استفاده شده است.

جدول 1- شرایط عملکردی A-60

Species	Pressure [MPa]	Mass flow rate [g/s]	Temperature [K]	Density [kg/m ³]	Velocity [m/s]
H ₂	6	70	287	5.51	236
O ₂	6	100	85	1177.8	4.35

برای تخمین اولیه مقدار انرژی جنبشی آشفستگی و همچنین نرخ اضمحلال ادی ها برای شرط مرزی ورودی هوای انژکتور از معادلات زیر استفاده شده است [14].

$$\tilde{k}_{inlet} = \frac{3}{2} \left(\left| \tilde{U}_{inlet} \right| I_t \right)^2 \quad (19)$$

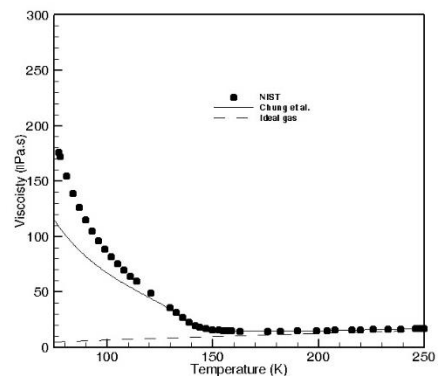
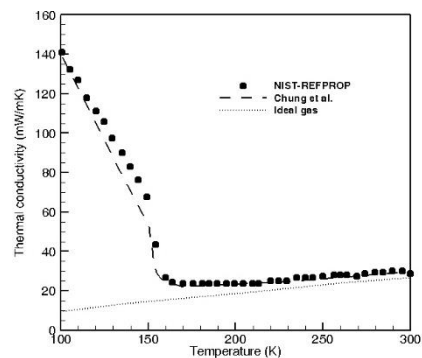
$$\tilde{\epsilon}_{inlet} = C_\mu^{3/4} \frac{\tilde{k}_{inlet}^{3/2}}{0.07 D_h} \quad (20)$$

به‌منظور حصول اطمینان از عدم وابستگی حل عددی به شبکه محاسباتی مورد نظر، استقلال از شبکه مورد مطالعه قرار گرفت به دلیل تغییرات غیر خطی پارامترهای ترمودینامیکی در مجاورت انژکتور ورودی، حجم سلولهای محاسباتی در آن ناحیه افزایش پیدا کرده است. شرایط سیال واقعی با اضافه کردن توابع مضاعف به پارامترهایی مانند ظرفیت حرارتی، آنتالپی و آنتروپی اعمال شده است. اثرات سورت و دوفور در شرایط فشار بالا ناچیزی می‌باشد و از آنها صرف نظر شده است. اثر سلولهای محاسباتی بر شبیه سازی حاضر به صورت گسترده با در نظر گرفتن چهار ساختار سلولی از بازه 1.2×10^4 تا 1.35×10^5 مورد بررسی قرار گرفته است. میزان تغییرات دمای محوری برای هر سلول محاسباتی در شکل (5) نشان داده شده است. با تغییر تعداد

ایده آل برای چگالی و ظرفیت حرارتی ویژه اکسیژن برای دماهای مختلف و در فشار 60 بار آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در دماهای پایین تر از

$$\eta = \eta^* \eta^0 = \eta^* \frac{40.785 F_{Cm} (M_m T)^{1/2}}{V_{Cm}^{2/3} \Omega_v} \quad (15)$$

که در آن $\eta^0 = \eta^*$ ویسکوزیته فشار پایین $\eta^* = \eta$ ترم اصلاحی برای ویسکوزیته فشار بالا $M_m =$ وزن مولکولی مخلوط $V_{Cm} =$ حجم بحرانی مخلوط $\Omega_v =$ انتگرال برخورد $F_{Cm} = 1 - 0.2756 \omega_m + 0.059035 \mu_{rm}^4 + \kappa_m$ در معادله فوق F_{Cm} و ضریب استریک مخلوط و κ_m یک فاکتور مخصوص اصلاح برای مواد با شرایط پولاریته بالا مانند الکل و اسیدها می‌باشد. در شکل (3) مقایسه بین داده های NIST، مدل چانگ و شرایط گاز ایده آل برای ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی اکسیژن برای دماهای مختلف و در فشار 60 بار آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در دماهای پایین تر از دمای شبه بحرانی اکسیژن و در شرایطی که سیال در شرایط گذر-بحرانی قرار دارد اختلاف بین داده های NIST با شرایط گاز ایده آل فاصله بسیاری دارد و در دماهای بالاتر از بحرانی به داده های گاز ایده آل نزدیک می‌شود. با این حال در بیشتر دماها داده های مدل چانگ با داده های NIST همخوانی نسبتاً مناسبی دارد و به همین دلیل از این مدل می‌توان برای محاسبه خواص انتقال در شرایط فوق بحرانی استفاده کرد.



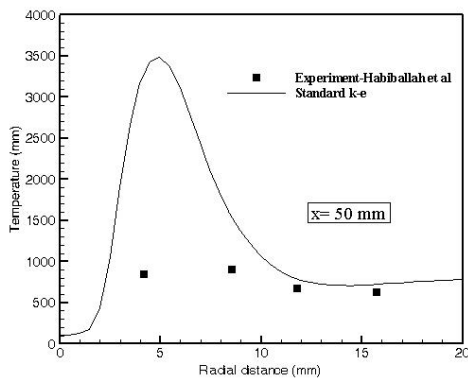
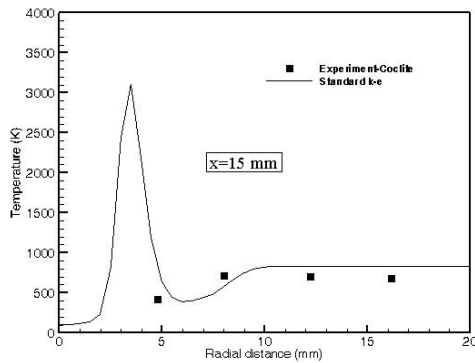
شکل 3: خواص انتقال گاز ایده آل-مدل چانگ و داده های NIST-هدایت حرارتی(بالا)- ویسکوزیته (پایین)

هندسه و شرایط مرزی

هندسه تجربی آزمایش A-60 مربوط به تست استند RCM03 می

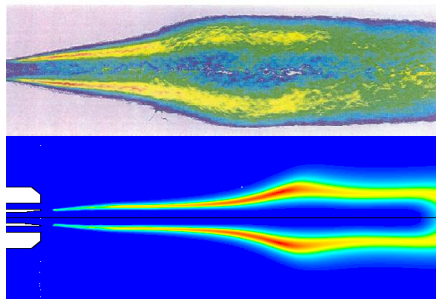
سلولها

بین داده های تجربی و شبیه سازی وجود دارد. در ناحیه داخلی که اختلاط بین سوخت و اکسنده وجود دارد دمای پیش بینی شده با تجربی اختلاف بیشتری نشان می دهد.



شکل ۷: توزیع شعاعی دما در دو فاصله طولی مختلف

در شکل (۸) کانتور OH^* شرایط تجربی با عددی مقایسه شده است. توزیع رادیکال OH می تواند معیار مناسبی از شکل و محل تشکیل شعله باشد. همانطور که مشاهده می شود تطابق مناسبی بین شبیه سازی عددی و تصاویر تجربی وجود دارد. در ناحیه شعله یک انبساط ناگهانی مشاهده می شود که در داده های تجربی و عددی مشترک می باشد. این انبساط را می توان از اثر پدیده شبه جوشش دانست. این انبساط در $X=60mm$ از ورودی محفظه رخ می دهد.

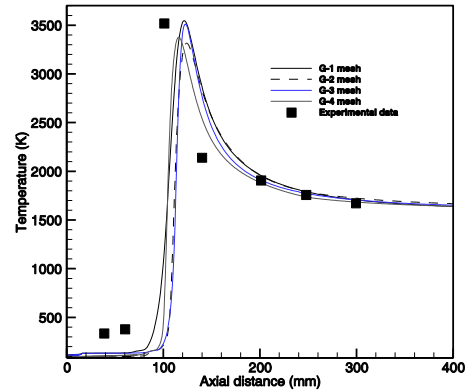


شکل ۸: توزیع رادیکال OH برای حالت تجربی و شبیه سازی عددی

در شکل (۹) کانتور دما به همراه خطوط جریان آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود، دو ناحیه چرخشی یکی در بیرون شعله و در مجاورت دیواره و دیگری در داخل شعله شکل گرفته است. گردابه بیرونی در اثر برهمکنش جریان شعله با دیواره می باشد و ابعاد و مشخصات آن وابسته به

باشد [21] که در دومین کارگاه بین المللی مطالعه بر روی احتراق راکت ارائه شده است. مقطع محفظه احتراق مقطع مربعی با ابعاد 50×50 mm طول آن $458mm$ قطر نازل آن 9 mm و طول قسمت همگرایی آن 20 می باشد. محفظه دارای یک انژکتور برشی می باشد که قطر مرکزی آن مربوط

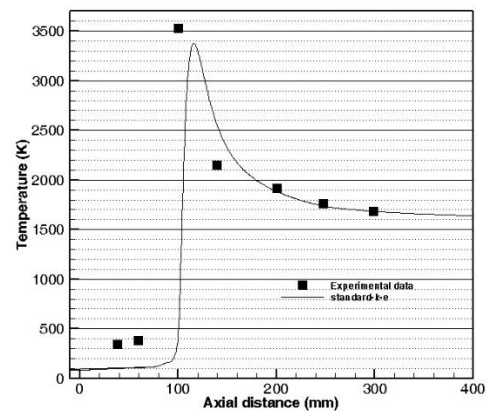
از 1.2×10^4 به عنوان کمترین تعداد تا 1.35×10^5 به عنوان بیشترین تعداد، ماکزیمم دمای پیش بینی شده 9 درصد انحراف دارد.



شکل ۵: عدم وابستگی حل عددی به مش - توزیع محوری دما

بحث بر روی نتایج

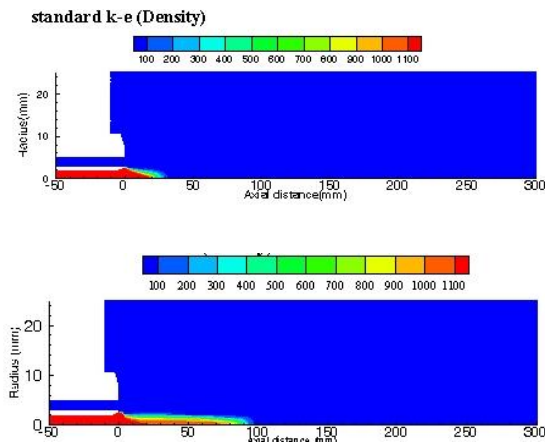
در شکل (۶) توزیع دما بر روی محور مرکزی محفظه احتراق و مقایسه نتایج آن با داده های تجربی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود شبیه سازی عددی تطابق مناسبی با مقادیر تجربی دارد. بیشتر اختلاف در ناحیه ورودی اکسیژن مایع و همچنین محل ماکزیمم دمای شعله می باشد. در ادامه شعله و با خارج شدن از شرایط گذر-جرانی به دلیل افزایش دما، اختلاف حل عددی با داده های تجربی نیز به شدت کاهش می یابد.



شکل ۶: توزیع محوری دما برای حالت تجربی و حل عددی

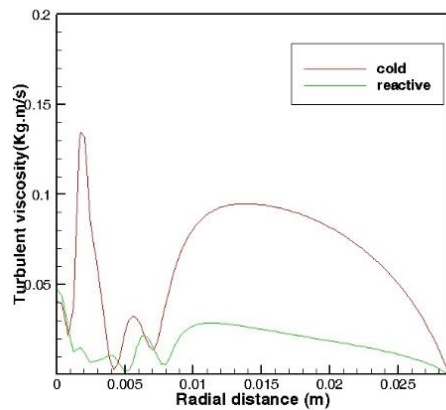
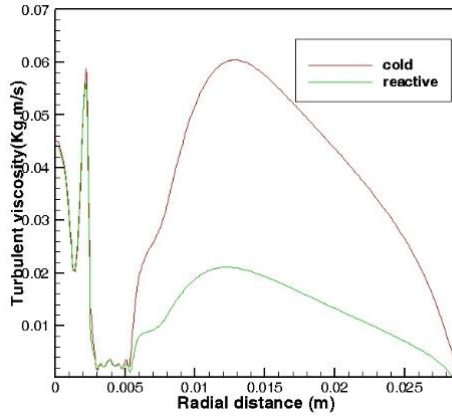
در شکل (۷) مقایسه بین توزیع دمای شعاعی در فواصل 15 و 50 میلیمتری از ورودی محفظه احتراق برای شبیه سازی عددی و داده های تجربی نشان داده شده است. همانطور که در فاصله 15 میلیمتری نشان داده شده است، در نقاطی که داده های تجربی موجود است، تطابق مناسبی بین شبیه سازی و نتایج تست وجود دارد. در محل شعله که با یک پیک دمایی در فاصله بین 3 تا 5 میلیمتری می باشد اندازه گیری تجربی وجود نداشته است و نمی توان شرایط شبیه سازی را با تجربی مقایسه کرد. با این

قطر محفظه



شکل ۱۱: کانتور توزیع چگالی برای حالت غیر واکنشی (بالا) و واکنشی (پایین)

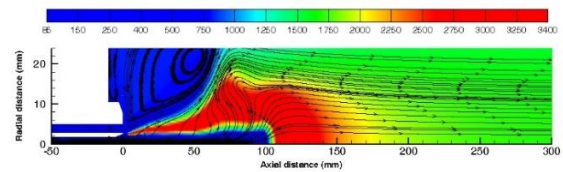
همانطور که در شکل (۱۱) دیده می شود، ویسکوزیته آشفته در حالت غیر واکنشی (سرد) در مقاطع مختلف بیشتر از ویسکوزیته آشفته در شرایط واکنشی (گرم) می باشد. همانطور که مشاهده می شود در $x=1\text{mm}$ در دهانه ورودی انرژی کانتور میزان ویسکوزیته آشفته دو حالت تقریباً برابر است اما هر چه در طول محفظه پیش می رود میزان ویسکوزیته آشفته حالت غیر-واکنشی به طرز قابل توجهی افزایش می یابد. همانطور که مشاهده می شود



شکل ۱۲: توزیع شعاعی ویسکوزیته آشفته در فواصل $x=1\text{mm}$ (بالا) و $x=10\text{mm}$ (پایین) از ورودی محفظه احتراق

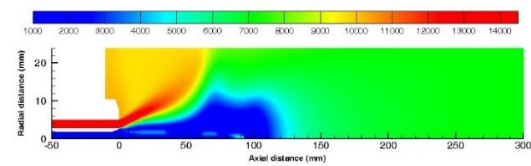
حال داده های مربوط به توزیع محوری دما نشان دهنده پیش بینی مناسب شبیه سازی در ناحیه شعله می باشد. در فاصله محوری $x=50\text{mm}$ ، در ناحیه خارج شعله تطابق مناسبی

احتراق می باشد. گردابه درونی در اثر تغییرات ترمودینامیکی داخل شعله و پدیده شبه جوشش ایجاد می شود. اکسیژن ورودی در شرایط گذر بحرانی وارد محفظه می شود و شرایط مایع مانند دارد. در واقع دارای چگالی مانند مایع و نفوذ گازی می باشد. در حین حرکت در طول محفظه و افزایش دمای آن ناشی از حرارت شعله اطراف، دمای آن نیز بالا می رود و در این حالت هنگامی که به دمای شبه بحرانی اکسیژن (در حدود 158.5 کلوین) می رسد، ظرفیت حرارتی ویژه آن به شدت افزایش پیدا کرده و چگالی آن نیز کاهش می یابد. در این حالت وارد ناحیه گاز مانند می شود و یک افزایش حجم ناگهانی نشان می دهد. این افزایش حجم ناگهانی در ناحیه شعله سبب ایجاد یک جریان چرخشی در محدوده $x=80\text{mm}$ می شود. این ناحیه چرخشی سبب افزایش اختلاط و کوچک شدن طول شعله می شود. یک ناحیه شانه ای شکل در اثر این چرخش ایجاد می شود که در خطوط جریان قابل مشاهده می باشد. همچنین از کانتور توزیع دما می توان افزایش ابعاد جت اکسیژن در انتها را مشاهده کرد.



شکل ۹: توزیع دما به همراه خطوط جریان

در شکل (۱۰) کانتور توزیع ظرفیت حرارتی ویژه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، در مرکز بین اکسیژن ورودی و شعله ظرفیت حرارتی در طول محفظه افزایش می یابد و در ناحیه حدودی $x=90\text{mm}$ به بیشترین مقدار خود می رسد که در واقع این ناحیه شبه جوشش می باشد که تغییر اکسیژن مایع مانند به گاز مانند در همین ناحیه اتفاق می افتد.



شکل ۱۰: توزیع ظرفیت حرارتی ویژه

در شکل (۱۱) توزیع چگالی در شرایط واکنشی و غیر واکنشی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود بر خلاف انتظار، جریان با چگالی بالا (با شرایط مایع مانند) در شرایط سرد کوتاهتر از شرایط واکنشی می باشد. به عبارت دیگر جریان در حالتی که به صورت غیر واکنشی وارد محفظه می شود زودتر مخلوط می شود ولی در شرایط واکنشی اکسیژن ورودی با چگالی بالا بیشتر در محفظه نفوذ می کند. در حالت غیر-واکنشی ماکزیمم چگالی در راستای محور تا $x=30\text{mm}$ وجود دارد در حالیکه در شرایط واکنشی چگالی با محدوده 1200kg/m^3 تا محدوده $x=90\text{mm}$ دیده می شود. با توجه به اینکه در شرایط واکنشی، اطراف هسته چگال

اکسیژن را شعله با دمای ۳۰۰۰ کلوین تشکیل می دهد، کشیده تر شدن جریان با چگالی بالا غیر منتظره بوده است. این شرایط را می توان به دلیل ضعیف شدن جریان برشی به دلیل انبساط جریان در اثر پدیده شبه جوشش در شرایط واکنشی دانست.

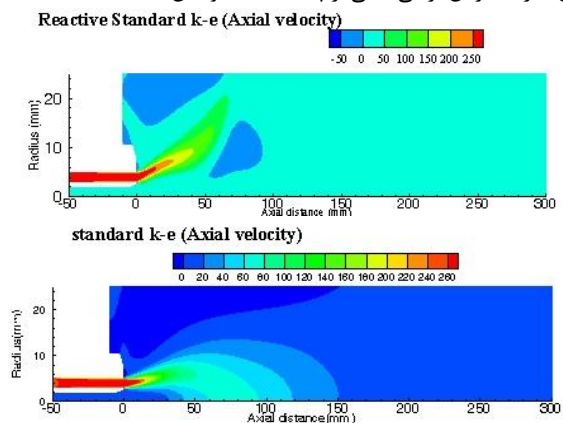
حرارت بالا در اثر بالا بودن هدایت حرارتی آشفته بین هیدروژن دما بالا با اکسیژن دما پایین می شود. در شرایط واکنشی اما یک انبساط ناگهانی در اثر پدیده شبه جوشش در داخل شعله ایجاد می شود که باعث می شود جت هیدروژن به سمت دیواره منحرف بشود و در نتیجه ویسکوزیته آشفته در ناحیه برشی که محل انتقال جرم و انرژی بین دو جریان می باشد کاهش یابد و در نتیجه میزان انتقال حرارت به هسته اکسیژن کاهش می یابد و جت اکسیژن در شرایط مایع مانند فاصله بیشتری را در محفظه نفوذ می کند و دیرتر خط Widom را رد کرده و وارد فاز گاز مانند می شود.

مراجع

- 1- Smith, R., Inomata, H., and Peters, C. (Eds.), "Introduction to Supercritical Fluids: A Spreadsheet-based Approach", Elsevier Science, 2013.
- 2- Newman, J.A. and Brzustowski, T.A., "Behavior of a liquid jet near the thermodynamic critical region", AIAA Journal, 9:1959-1602 (1971).
- 3- Simeoni, G., Bryk, T., Gorelli, F., Krisch, M., Ruocco, G., Santoro, M., and Scopigno, T., "The Widom line as the crossover between liquid-like and gas-like behavior in supercritical fluids", Nature Physics. 6: 503-507 (2010).
- 4- w. Mayer, J. Telaar, R. Branam, Schneider. G., J. Hussong, "Raman measurements of cryogenic injection at supercritical pressure," Heat Mass Transfer, Vol. 8, p. 709-719, 2003.
- 5- R. Branam, W. Mayer, "Characterization of cryogenic injection at supercritical pressure," J. Propul. Power, Vol. 19, p.342-355, 2003.
- 6- R. Branam, J. Telaar, W. Mayer, "Simulation of cryogenic jet injection, RCM01, in O. Haidn (editor), Proceeding of the 2nd International Workshop on Rocket Combustion Modeling, 58-68.
- 7- j. Smith, D. Klimenko, W. Clauß and W. Mayer, "Supercritical LOX/Hydrogen Rocket Combustion Investigations Using Optical Diagnostics," in 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Indianapolis, 2002
- 8- W. Mayer and H. Tamura, "Propellant injection in a liquid oxygen/gaseous hydrogen rocket engine," Journal of Propulsion and Power Vol. 12, No. 6 , pp. 1137-1147, 1996.
- 9- H. Huo, X. Wang and V. Yang, "Several Fundamental Issues in Large Eddy Simulation of Supercritical Mixing and Combustion," in 52nd Aerospace Sciences Meeting, Maryland, 2014.
- 10- A. Ruiz and L. Selle, "Simulation of a turbulent supercritical hydrogen/oxygen flow behind a splitter plate: cold flow and flame stabilization," Sixth Mediterranean Combustion Symposium, Chia Laguna, Cagliari, Sardinia, Sardinia, Italy, 2011.
- 11- D. T. Banuti, "Crossing the widom-line-supercritical pseudo-boiling," J. of Supercritical Fluids, Vol. 98, p.12-16, 2015.
- 12- D. T. Banuti, K. Hannemann, "Effect of injector wall heat flux on cryogenic injection," AIAA Paper 2010-7139, 2010.

در $x=10\text{mm}$ اختلاف بین ویسکوزیته آشفته در حالت واکنشی و غیر-واکنشی بیشتر می شود. با توجه به اینکه ویسکوزیته آشفته معیاری از میزان اختلاط دو سیال در جریان برشی می باشد می توان نتیجه گرفت که اختلاط در حالت غیر واکنشی بیشتر از حالت واکنشی می باشد. از طرفی با توجه به اینکه مکانیزم عمده انتقال حرارت در این لایه برشی بین جریان سرد اکسیژن مایع و ناحیه گرم اطراف از طریق هدایت حرارتی آشفته می باشد و این مکانیزم نیز به صورت مستقیم متناسب با ویسکوزیته آشفته می باشد در نتیجه میزان انتقال حرارت از جریان گرم هیدروژن به هسته سرد اکسیژن در شرایط جریان غیر-واکنشی با نرخ به مراتب بیشتری صورت می گیرد و هسته اکسیژن زودتر خط widom را رد کرده و از فاز مایع مانند وارد فاز گاز مانند می شود.

در شکل (۱۳) کانتور توزیع سرعت محوری برای حالت واکنشی و غیر واکنشی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در حالت غیر واکنشی، به دلیل وجود جریان جت با سرعت بالای هیدروژن و اختلاف سرعت بالا با اکسیژن مایع یک جریان برش محوری بسیار قوی وجود دارد که اختلاط بین دو جریان نیز با نرخ بالا صورت می گیرد. همانطور که دیده می شود در ناحیه جریان منطقه چرخشی خاصی شکل نگرفته است. در شرایط جریان واکنشی، مشاهده می شود که در اثر پدیده شبه جوشش یک انبساط شدید رخ می دهد که سبب ایجاد یک جریان چرخشی ضعیف می شود و این شرایط باعث انحراف جریان هیدروژن به سمت دیواره می شود. این انحراف جریان سبب کاهش قدرت جریان برش محوری و در نتیجه ویسکوزیته آشفته می شود. در واقع می توان کاهش اختلاط جریان واکنشی نسبت به جریان غیر-واکنشی را ضعیف شدن قدرت جریان برشی ناشی از پدیده شبه جوشش دانست.



شکل ۱۳: کانتور توزیع سرعت محوری برای حالت واکنشی (بالا) و غیر-واکنشی (پایین)

نتیجه گیری

در مقاله حاضر اختلاط در شرایط واکنشی و غیر-واکنشی یک جریان برش محوری گذر-بحرانی مورد بررسی قرار گرفته است. محفظه احتراق RCM-01 مبنای شبیه سازی و صحنه گذاری مدل سازی بوده است.

نتایج حاصل از مدلسازی با داد های تجربی معتبر موجود تطابق مناسبی دارد. در حالتی که جریان برشی محوری غیر واکنشی می باشد یک جریان برشی محوری قوی در اثر اختلاف سرعت زیاد بین دو جت سوخت و اکسنده ایجاد می شود که سبب اختلاط بسیار سریع بین دو جریان و همچنین انتقال

13- D. T. Banuti, V. Hannemann, K. Hannemann, and B. Weigand, "An efficient multi-fluid-mixing model for real gas reacting flows in liquid propellant rocket engines," *Combustion and Flame*, Vol. 168, p.98-112, 2016.

14- H. Versteeg and W. Malalasekera, "An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method," Addison Wesley-Longman, 1995.

15- B. E. Launder and D. B. Spalding. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England. 1972.

16- B. F. Magnussen and B. Hjertager, "On the structure of turbulence and a generalized eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow," in 19th AIAA Aerospace Meeting, St. Louis, USA, 1981.

17- J. Li, Z. Zhao, A. Kazakov, F. L. Dryer, "An updated comprehension chemical kinetics," *International Journal of chemical kinetics*, Vol. 36, p. 566-575, 2004.

18- G. Soave, "Equation constants from a modified Redlich-Kwong equation of state," *Chem Eng Sci*, p. 1197, 1972.

19- E. W. Lemmon, M. I. Huber, M. O. McLinden, "NIST standard reference database 23: reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP, version 9.1", National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg. 2013.

20- T. H. Chung, M. Ajlan, L. L. Lee, and K. E. Starling, "Generalized multiparameter correlation for nonpolar and polar fluid transport properties," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 27, pp. 671-679, 1988.

21- M. Habiballah, M. Orain, F. Grisch, L. Vingert, P. Gicquel, "Experimental studies of high-pressure cryogenic flames on the Mascotte facility," *Combust. Sci. Technol.* Vol. 178, p. 101-128, 2006.