



## مطالعه عددی تأثیر پارامترهای هندسی اسپری در جریان سوخت و هسته هوا در اتمایزر چرخشی فشاری انتهایی باز

محمد مرادی<sup>۱</sup>، سعید کریمیان علی آبادی<sup>۲\*</sup>، فتح اله امی<sup>۳</sup> و مهدی سرحدی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

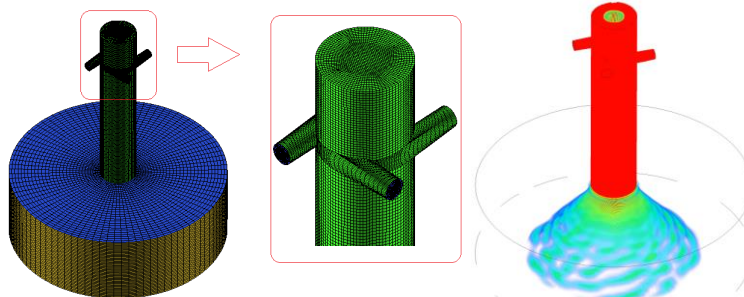
<sup>۳</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۴</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیر طوسی، تهران، ایران

### برجسته‌ها

- بررسی عددی اتمایزر چرخشی فشاری
- مطالعه تأثیر زاویه اسپری
- بررسی هیدرودینامیک جریان

### چکیده گرافیکی



### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۴

بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۸

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۰۴/۰۷

\*نویسنده مسئول:

karimian@modares.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

مدل چند فازی حجم سیال

مدل توربولانسی

اتمایزر فشاری چرخشی انتها باز

توربین گازی

حل عددی

### چکیده

در این پژوهش به بررسی عددی جریان داخلی اتمایزر فشار-چرخشی انتها باز پرداخته خواهد شد که کاربرد زیادی در موتور توربین گازی و پیش‌رانه‌های فضایی دارد. برای شبیه‌سازی جریان داخلی اتمایزر از مدل چند فازی حجم سیال بهره گرفته شده است. همچنین به دلیل ماهیت جریان چرخشی داخل اتمایزر از مدل توربولانسی RNG k-ε استفاده گردید. به منظور دستیابی به نتایج بهتر از مش سازمان یافته استفاده شد. در این پژوهش پارامترهای اسپری، نظیر ضخامت فیلم مایع، زاویه چتر پاشش، ضریب تخلیه و کانتورهای توزیع سرعت و فشار مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. شبیه‌سازی اتمایزر انتهایی باز با نسبت  $L/D = 5$  و همچنین استفاده از مش سازمان یافته و لحاظ کردن سوخت کروسین برای ایجاد شرایط نزدیک به کارکرد توربین گازی، از جمله مواردی بود که پژوهش حاضر را با دیگر پژوهش‌ها متمایز می‌سازد. همچنین نتایج نشان داد که در فشار ۰/۵ مگا پاسکال زمان لازم برای رسیدن سوخت در اتمایزر مورد استفاده کمتر از ۱/۵ میلی ثانیه بوده و نیز با روش حجم سیال علاوه بر مدل جریان‌های داخل اتمایزر و دستیابی هیدرودینامیک جریان، می‌توان وجود موج‌ها و شکست چتر پاشش و تبدیل به قطرات بزرگ‌تر را مشاهده نمود. زاویه اسپری و ضریب تخلیه برای اتمایزر مورد بررسی به ترتیب برابر ۷۴/۸ و ۰/۱۷ ثبت گردید.

## ۱- مقدمه

اولیه در یک اتمایزر چرخشی-فشاری، با کاربرد توربین گازی با استفاده از مدل حجم سیال VoF و ایجاد حدود ۳۰ میلیون مش، طول شکست، بردار سرعت و الگوی اسپری را به دست آوردند. در آخر، دریافتند که دقت محاسبات به مقدار بسیار زیاد به اندازه شبکه بستگی دارد. لیگامنت‌هایی که ایجاد می‌شود با تغییر اندازه شبکه، اندازه و تعداد متفاوتی دارد. فاستر و همکاران [۱۱] نیز نتیجه مشابهی به دست آوردند، هزینه‌ی زیاد و مدت‌زمان طولانی شبیه‌سازی مهم‌ترین موانع برای بررسی ایجاد و شکست اسپری است. آن‌ها از مش Octree برای شبکه‌بندی و مدل حجم سیال برای مدل‌سازی و دست‌یابی سطح مشترک دو فاز در قالب کد استفاده کرده و داده‌های خود را برای هندسه دوبعدی و سه‌بعدی در نرم‌افزار Gerris، به دست آوردند. هالدر و همکاران [۱۲ و ۱۳]، تأثیرات جریان نازل و هندسه نازل بر شکل و اندازه یک هسته هوا با استفاده از چند نازل چرخشی به صورت تجربی انجام دادند، قطر هسته هوا را اندازه گرفتند. آن‌ها نیز مشاهده کردند که تا یک عدد رینولدز، قطر هسته هوا، افزایش می‌یابد، بعد این مقدار، هسته هوا مستقل از عدد رینولدز می‌شود. مون و همکاران [۱۴] به تأثیر فشار تزریق و  $L/D$  بر روی ضخامت فیلم مایع در یک اتمایزر فشار چرخشی با کاربرد در موتورهای تزریق مستقیم به صورت تجربی پرداخته و فرمولی برای ضخامت فیلم مایع پیشنهاد کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با تغییر فشار تزریق، ضخامت فیلم مایع تغییر نمی‌کند درحالی‌که طول نازل به قطر آن، تأثیر قابل توجهی بر روی ضخامت فیلم دارد که با افزایش این نسبت، ضخامت فیلم نیز افزایش دارد. لیو و همکاران [۱۵] در مطالعات تجربی خود مشاهده کردند که طول رشد و زاویه پاشش با رشد ثابت مشخصه هندسی در اتمایزر چرخشی-فشاری افزایش می‌یابد. امینی [۱۶]، میدان جریان در داخل یک اتمایزر فشاری-چرخشی را هم به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام دادند. او اثر پارامترهای هندسی مختلف، نظیر تأثیر  $L/D$  و ثابت انژکتور بر زاویه مخروط اسپری، ضریب تخلیه و قطر هسته هوا را بررسی کردند و در نهایت در جریان‌های ویسکوز و غیر ویسکوز را با هم مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که قطر هسته هوا با افزایش عدد رینولدز، بیشتر می‌شود که

اتمایزرها در انواع مختلفی از فرایندهای مهم صنعتی مانند احتراق، اسپری خشک‌کن‌ها سیستم‌های سرمایشی، خوشبوکننده‌ها، ایجاد رسوبات، تمیزکاری سطوح، اسپری‌های تنفسی، کشاورزی، صنایع رنگ‌آمیزی و در صنایع مختلف بسیاری کاربرد دارد [۱]. فرایند اتمیزه شدن سوخت و تبخیر آن برای عملکرد سیستم احتراق توربین گاز، از اهمیت اساسی برخوردار است. شدت تبخیر عامل مهمی در طول شعله و اندازه محفظه احتراق دارد، بنابراین لازم است تعداد زیادی قطره با اندازه کوچک، با زاویه اسپری خاص تولید شود تا سطح بین مایع و گاز پیرامون به حداکثر مقدار افزایش یافته تا سریع‌تر عمل تبخیر صورت گیرد، در نتیجه کیفیت اسپری بر محدوده پایداری، راندمان احتراق و میزان آلاینده‌ها تأثیرگذار است [۴-۲]. در یک اتمایزر، مواردی از قبیل ابعاد محفظه چرخش، شکل خروجی نازل، میزان دبی گاز یا مایع، فشار تزریق، خواص فیزیکی و شیمیایی مایع تزریق شونده، اتلافات، ضریب تخلیه، زاویه اسپری، توزیع کمی و کیفی قطرات و متوسط قطر قطرات می‌توان مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار داد. اخیراً مطالعاتی در زمینه تأثیر این پارامترها بر روی هسته هوا و همچنین در نهایت بر روی کیفیت اسپری انجام گرفته است [۵ و ۶].

لیو و همکاران [۷] اثر طول محفظه چرخش و گرانروی مایعات را بر روی اندازه هسته هوا در پنج اتمایزر با طول محفظه چرخشی متفاوت را به صورت تئوری و تجربی بررسی کردند. مشاهده کردند که با کاهش طول محفظه چرخش و همچنین کاهش ویسکوزیته مایع موجب افزایش اندازه هسته هوا می‌گردد. نوری و همکاران [۸] در بررسی‌های عددی و تئوری خود از وجود موج‌های خاص در اتمایزر چرخشی فشاری که از طریق هسته هوا به چتر پاشش منتقل می‌شود، گزارش کرده‌اند. ژانگ و همکاران [۹] اثر فشار تزریق و قطر روزنه بر روی شکل اسپری، توزیع سرعت و زاویه اسپری را به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها با معرفی یک فشار تزریق بحرانی (۱/۵ مگا پاسکال)، بیشتر از این فشار، زاویه پاشش مستقل از فشار عمل می‌کند. گالبیاتی و همکاران [۱۰] برای بررسی مکانیسم شکست

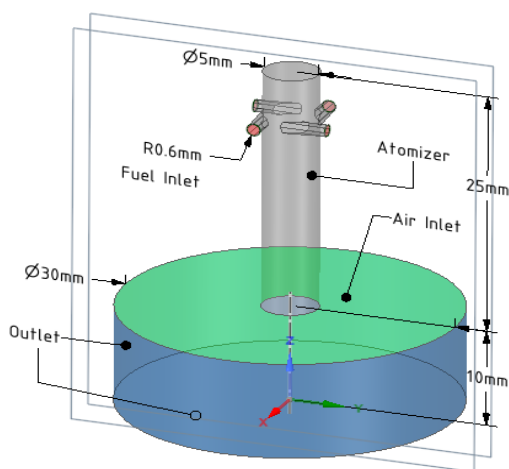
جزئی تقریباً ثابت می‌مانند. آن‌ها نیز مشاهده کردند که با افزایش ثابت مشخصه هندسی، پارامترهای ضخامت فیلم مایع، ضریب تخلیه، طول شکست و سرعت در محفظه چرخش کاهش می‌یابد. پارامتر هندسی  $L/D$  (طول بر قطر) اتمایزر عدد ۱۰ انتخاب کرده بودند.

در این مقاله در ادامه کار آقای چن و همکاران [۲۰] هندسه اتمایزر  $L/D$  برابر ۵ طراحی گردید و همچنین بر اساس مطالعات صورت گرفته تغییراتی از جمله استفاده از شبکه سازمان‌یافته برای افزایش دقت و کاهش تعداد سلول محاسباتی و نیز با انتخاب سوخت و شرایط ورودی مناسب درصد ایجاد شرایط مشابه کارکرد توربین گازی شده است.

## ۲- مدل سازی و تنظیمات حل عددی

### ۲-۱- معرفی هندسه مبنا

اتمایزر چرخشی فشاری انتهایی باز، از تعدادی ورودی مماسی وصل شده به استوانه‌ای بزرگ‌تر که محفظه چرخش نامیده می‌شود، تشکیل شده است که دارای ابعاد هندسی مختلفی هست. هندسه مورد استفاده در این پژوهش دارای چهار ورودی مطابق شکل ۱، آورده شده است که دارای نسبت طول به قطر محفظه چرخش برابر ۵ انتخاب گردیده است.



شکل (۱): نمای کلی و ابعادی

در نتیجه آن ضخامت فیلم مایع در خروجی اتمایزر کاهش می‌یابد، همچنین مایع با ویسکوزیته بالا، زاویه اسپری کمتری داشت. اسکلاپز و همکاران [۱۷] در پژوهش خود به شبیه‌سازی تزریق سوخت و اتمایزشن اتمایزر هوا انفجاری ترکیبی با دقت بالا برای حالت کارکرد یک موتور توربین گاز واقعی در شرایط احتراق رقیق، پرداختند، برای تسخیر و ردیابی سطح بین مایع و گاز با بکارگیری مدل حجم سیال که با چهارچوب LSP برای دریافت آثار دینامیک تجزیه ثانویه ترکیب شده در اتمایزر فشاری پایلوت شبیه‌سازی کنند. آن‌ها دریافتند طول شکست به شدت به وضوح شبکه بستگی دارد که نیازمند به هزینه محاسباتی بالایی دارد. آن‌ها برای شبیه‌سازی نهایی از ۵۰ میلیون سلول شش‌وجهی استفاده کردند. رواس و همکاران [۱۸] مطالعات خود را در زمینه بررسی رفتار جریان داخلی اتمایزر دو پیش‌رانه چرخشی که در پیش‌رانه‌های فضایی کاربرد دارد، متشکل از ترکیب اتمایزرز انتها باز (بدون نازل) و انتها بسته (با نازل) می‌باشد، به صورت تجربی و عددی انجام دادند. آن‌ها برای شبیه‌سازی عددی خود از قابلیت VOF برای مدل کردن سطح مشترک دو سیال استفاده کردند. امی و همکاران [۱۹] پژوهش خود را در زمینه پاشش جت سوخت در جریان هوای عرضی (جریان‌های متقاطع) که از دسته اتمایزرهای اوربیتی محسوب می‌شود، انجام دادند، از مدل VOF جهت مدل‌سازی جریان چند فازی به صورت دوبعدی استفاده نمودند. آن‌ها برای شبیه‌سازی عددی از روش شبکه‌بندی ریز شده موضعی به صورت سازمان‌یافته برای کاهش تعداد شبکه استفاده کردند تا قطرات با اندازه کوچک‌تری با استفاده از مدل حجم سیال مشاهده کنند. چن و همکاران [۲۰] در کار عددی و تجربی خود به شبیه‌سازی اتمایزر چرخشی فشاری انتهایی باز پرداختند آن‌ها با استفاده از سیستم اپتیکی با ضبط تعداد عکس بالا توانستند پارامترهای زاویه اسپری، طول شکست و همچنین ضریب تخلیه، توزیع سرعت در محفظه چرخش را به دست آورند. بررسی آن‌ها نشان داد که در فشار تزریق پایین، فشار تزریق با ضریب تخلیه و زاویه مخروط اسپری متناسب است و هنگامی که فشار تزریق به مقدار بحرانی ۰/۴ مگا پاسکال می‌رسد ضریب تخلیه و زاویه مخروط اسپری با نوسانات

## ۲-۲- معادلات جریان و مدل توربولانسی

در این پژوهش میدان جریان لزج، تراکم ناپذیر و آشفته است. با توجه به ساختار جریان چندفازی و اهداف پژوهش از مدل VOF برای ردیابی سطح مشترک بین دو فاز استفاده شده است. این مدل در تسخیر سطوح دو یا چند فاز مخلوط نشدنی در حالت‌های پایا و ناپایا، با دیدگاه اویلری، مورد استفاده قرار می‌گیرد. از کاربرد این مدل می‌توان به پیش‌بینی شکست مایع در اتمایزرها، حرکت حباب‌های بزرگ در یک مایع و... اشاره داشت. پارامتر کسر حجمی ( $\alpha$ ) که در هر حجم کنترل مجموع کسر حجمی فازها برابر یک می‌شود خواص و متغیرهای هر سلول نیز از میانگین کسر حجمی تعیین می‌شود، مقادیر کسر حجمی نمایان گر ۳ حالت زیر می‌باشد: (با فرض  $\alpha_q$  کسر حجمی فاز ثانویه، مایع، باشد):

$$(1) \quad (\alpha_q = 0) \text{ سلول پر از فاز اول (گاز) می‌باشد.}$$

$$(2) \quad (0 < \alpha_q < 1) \text{ سلول هم دارای فاز اول (گاز) و هم فاز دوم (مایع) می‌باشد.}$$

$$(3) \quad (\alpha_q = 1) \text{ سلول پر از فاز دوم (مایع) می‌باشد.}$$

ردیابی سطوح بین فازها با حل معادله انتقال  $\alpha$  (معادله پیوستگی) برای یکی از فازها انجام می‌شود. در واقع مدل VOF همان mixture و به اضافه معادله انتقال  $\alpha$  باشد. برای فاز  $q$  داریم:

$$(1) \quad \frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp})$$

با فرض عدم اختلاط دو فاز می‌توان ترم سمت راست را صفر در نظر گرفت، در برخی موارد که تغییر فاز داریم، مثلاً وجود تبخیر، این ترم فعال می‌شود،  $\rho_q$  و  $\vec{v}_q$  به ترتیب سرعت و چگالی فاز  $q$  می‌باشد. کسر حجمی فاز اولیه از معادله زیر به دست می‌آید:

$$(2) \quad \sum_{q=1}^n \alpha_q = 1$$

به‌طور کلی برای یک سیستم فاز، چگالی میانگین کسر حجمی به شکل زیر ظاهر می‌شود:

$$(3) \quad \rho = \sum \alpha_q \rho_q$$

دیگر خواص (به‌عنوان مثال ویسکوزیته) به این روش حساب می‌شود. یک معادله مومنتوم برای سراسر ناحیه، حل می‌شود و میدان سرعت بین فازها به دست می‌آید که به کسر حجمی، چگالی و ویسکوزیته وابسته است.

$$(4) \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v})$$

$$= -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

ترم‌های  $\rho \vec{g}$  و  $\vec{F}$  را ترم‌های برهم‌کنش بین فازی گویند که در واقع اختلاف معادلات تک فاز و دو فاز در همین ترم‌ها می‌باشد. مدل نیروی سطحی پیوسته، در این پژوهش به کار گرفته شده است. این مدل، اثرات تنش سطحی را به‌صورت سه‌بعدی و پیوسته بر روی سطح مایع-گاز در نظر می‌گیرد. نیروی سطح را می‌توان به‌صورت نیروی حجمی که در معادله مومنتوم اضافه می‌شود نوشت:

$$(5) \quad F_{vol} = \sigma_{ij} \frac{\rho k_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2} (\rho_i + \rho_j)}$$

در این معادله  $\rho$  چگالی حجم-متوسط (در معادله کسر حجمی سیگما دار) آمده است،  $k$  دیورژانس بردار یکه نرمال بر سطح است، اندیس‌های  $i$  و  $j$  نشانگر هر یک از فازها می‌باشد. با در نظر گرفتن فیزیک مسئله و همچنین هزینه محاسبات و نیز با توجه به مدلی که در مقالات مربوط به شبیه‌سازی اتمایزر فشار-چرخشی استفاده شده، مدل توربولانسی K-RNG برای جریان‌های چرخشی قوی مناسب است [۸ و ۱۸] انتخاب گردید، در مدل حجم سیال، برای کل فازها یک معادله برای  $k$  و یک معادله برای  $\varepsilon$  حل می‌شود. ضریب تخلیه به نسبت دبی جریان واقعی به دبی جریان تئوری گفته می‌شود. ضریب تخلیه از معادله زیر به دست می‌آید:

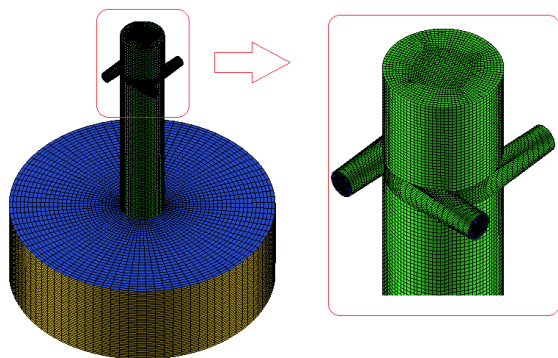
$$(6) \quad C_d = \frac{\dot{m}}{A \sqrt{2 \rho \Delta P}}$$

$\dot{m}$  دبی جریان سوخت،  $\Delta P$  اتلاف فشار تزریق و  $A$  مساحت مقطع ورودی جریان سوخت می‌باشد.

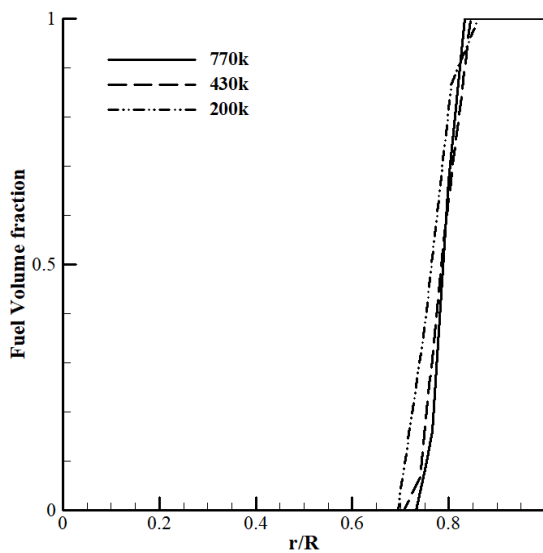
## ۲-۳- شرایط مرزی و شبکه حل عددی

شرایط مرزی برای ورودی و خروجی سوخت و هوا، بر پایه فشار تنظیم گردید، دو مجرا ورودی در نظر گرفته شده، فشار

می‌دهد، برای دستیابی دقیق سطح مشترک از طرح CICSAM انتخاب گردید. برای مدل بهتر جریان‌های چرخشی قوی از مدل توربولانسی K-RNG بهره گرفته شده است. تعداد شبکه با ۴۳۰ هزار سلول، بعد از بررسی نتایج، به‌عنوان شبکه محاسباتی مستقل از شبکه انتخاب گردید.



شکل (۲): شبکه‌بندی دامنه محاسباتی اتمایزر



شکل (۳): بررسی استقلال از شبکه محاسباتی، تغییرات کسر حجمی سوخت در ارتفاع ۲۰ میلی‌متری

#### ۲-۵- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی کار چن و همکاران [۲۰]، انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت. مشابهت هندسه دو اتمایزر، هر دو دارای الگوهای جریان مشابهی تجربه می‌کنند که این امکان را فراهم می‌کند که مدل‌های یکسانی نیز برای شبیه‌سازی داشته باشد. در مقایسه سرعت محوری هر دو فاز، حداکثر ۵

ورودی سوخت ۰/۵ مگا پاسکال و فشار هوای ورودی و همچنین فشار مجرای خروجی، فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است. شرط مرزی عدم لغزش هم برای دیواره انتخاب گردید. برای ایجاد شرایط مشابه حالت واقعی توربین گازی از سوخت کرازین مایع با فرمول شیمیایی  $C_{12}H_{23}$ ، جدول ۱ که سوخت موتور توربین گازی محسوب می‌شود، انتخاب گردیده است.

جدول (۱): مشخصات سوخت مورد استفاده

چگالی ( $kg/m^3$ )	۷۸۰
ویسکوزیته ( $kg/m.s$ )	۰/۰۰۲۴
کشش سطحی ( $N/m$ )	۰/۰۲۶۳۲۵۷

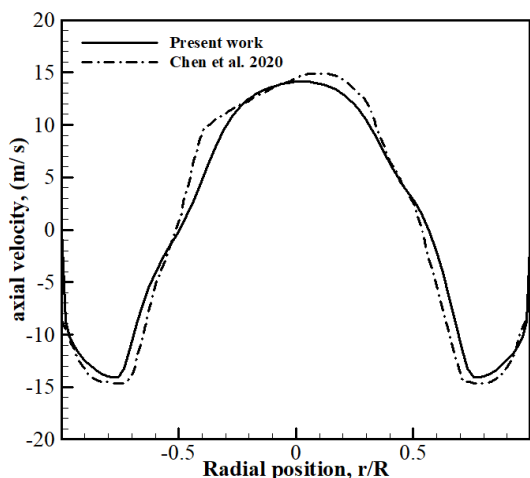
برای مش زنی هندسه اتمایزر به صورت کاملاً سازمان‌یافته، از نرم‌افزار ICEM استفاده است. باید توجه داشت که زاویه اسپری و طول شکست به مقدار بسیار زیادی به کیفیت مش بستگی دارد [۱۰، ۱۱ و ۱۷] و مش درشت مانع از دستیابی دقیق به هسته هوا و قطرات مایع می‌گردد. بدین منظور از ۴۳۰ هزار مش به شکل سلول شش‌وجهی مطابق شکل ۳ صورت گرفت.

#### ۲-۴- تنظیمات حل عددی

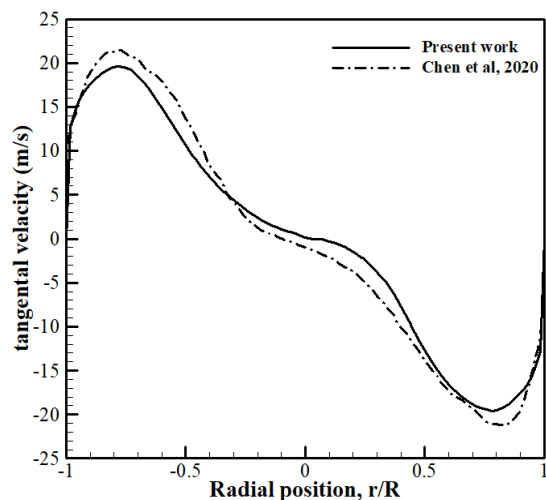
برای شبیه‌سازی اتمایزر مذکور، از نرم‌افزار تجاری موسوم به Ansys Fluent استفاده شد؛ که از روش گسسته سازی معادلات به صورت حجم محدود بهره می‌جوید. برای حل معادلات جریان از روش حل بر مبنای فشار استفاده شده است. از طرح گسسته سازی PRESTO برای فشار استفاده گردید. از روش حل PISO برای کوپل کردن سرعت، فشار استفاده گردید. برای دقت بالا از روش بادسو مرتبه دوم برای معادلات حرکت استفاده گردید. در ابتدای حل از گام زمانی  $5 \times 10^{-8}$  ثانیه لحاظ گردید، بعد پایداری نسبی، از گام زمانی  $1 \times 10^{-7}$  استفاده گردید. از مدل CSF برای مدل‌سازی کشش سطحی استفاده گردید.

از مدل VOF برای شبیه‌سازی جریان چند فازی استفاده شد، فاز اول را هوا و فاز دوم را سوخت انتخاب گردید. این روش اصطلاحاً روش وابسته به شبکه گویند، به صورتی که فقط ساختارهایی که بزرگ‌تر از شبکه می‌باشد، نشان

اتمایزر و ورودی‌های مماسی، با پر شدن محفظه چرخش از سوخت، جریان چرخشی نسبتاً قوی ایجاد می‌شود. مشخصات عامل ایجاد حرکت جریان سوخت با سرعت بالا بوده که موجب تشکیل جریان هوا با سرعت پایین‌تری در داخل محفظه چرخش می‌گردد که این جریان هوا را هسته هوا گویند. در شکل ۹ کانتور سرعت در صفحه XY برای جریان دوفاز (مجموعه گاز و سوخت) به نمایش درآمده است.



شکل (۴): سرعت محوری سیال (سوخت و هوا) در مقایسه با کار شبیه‌سازی پیشین، در فاصله ۲۰ میلی‌متری از دهانه اتمایزر



شکل (۵): مقایسه سرعت مماسی سیال (سوخت و هوا) در مقایسه با کار شبیه‌سازی پیشین، در فاصله ۲۰ میلی‌متری از دهانه اتمایزر

درصد خطا مشاهده گردید. منحنی مربوط به سرعت فاز گازی که در محدوده وسط نمودار قرار دارد، به دلیل نوسانات جریان گازی، با توجه به داده‌ها نسبت به گام‌های زمانی مختلف، طبیعی به نظر می‌رسد. مقدار جزئی خطا ناخواسته موقع برداشت اطلاعات از پژوهش چن و همکاران غیرقابل اجتناب می‌باشد.

در شکل ۵، سرعت مماسی، با داده‌های مقاله فوق‌الذکر مورد بررسی قرار داده شده است. در واقع سرعت مماسی گویای قدرت چرخشی جریان داخل محفظه چرخش می‌باشد. نحوه به دست آوردن موقعیت شعاعی هم مطابق قسمت قبلی بوده و در واقع سرعت مماسی روی همان خط که چن و همکاران استخراج کرده بودند، مورد بررسی قرار گرفت، در این قسمت هم خطای قابل قبول حداکثر ۸/۷ درصد ثبت گردید.

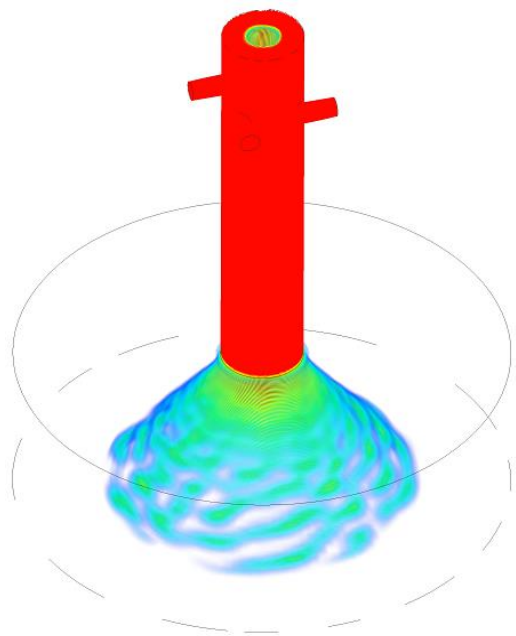
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- فرایند پر شدن سوخت داخل اتمایزر

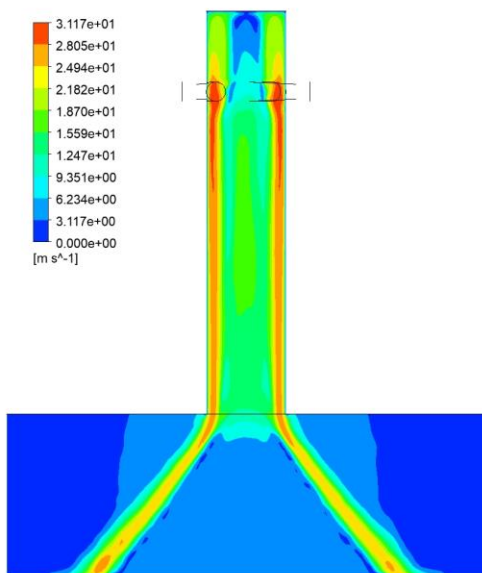
در گام زمانی اول سوخت با فشار و سرعت بالا وارد اتمایزر می‌شود، فشار ۰/۵ مگا پاسکال و سرعت آن در مقطع ورودی ۲۴/۵ متر بر ثانیه می‌باشد. شکل ۶ مربوط به ۴ زمان مختلف در مقطع ۲۰ میلی‌متری از انتهای دهانه اتمایزر می‌باشد که هسته هوا تحت تأثیر جریان سوخت ورودی هم در گذر زمان تغییر شکل می‌دهد. در زمان ۸/۸۵ میلی‌ثانیه، جریان در این مقطع به شکل ثابتی می‌رسد. در شکل ۷ فرایند پر شدن سوخت طی سه زمان مختلف در داخل محفظه چرخش قابل مشاهده می‌باشد که سوخت در عرض کمتر از ۱/۵ میلی‌ثانیه به دهانه اوریفیس می‌رسد. همچنین از زمان ۸/۸۵ میلی‌ثانیه، ضخامت سوخت به مقدار ثابتی می‌رسد. برای دستیابی به نمای کلی فرایند جریان سوخت مطابق شکل ۷، از متغیر کسر حجمی، کانتور حجمی ایجاد شده است.

#### ۳-۲- بررسی هیدرودینامیک جریان

در ادامه نتایج مربوط به هیدرودینامیک جریان در اتمایزر فشار-چرخشی انتهایی باز پرداخته می‌شود، به دلیل هندسه

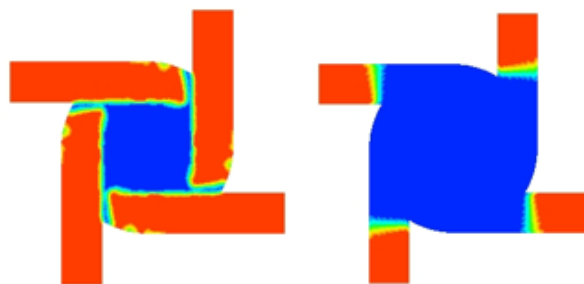


شکل (۸): کانتور حجمی رندر گرفته شده از کسر حجمی  
اتمايزر فشار-چرخشی انتها باز



شکل (۹): کانتور توزیع اندازه سرعت

در کانتور مربوط به اندازه سرعت حداکثر مقدار سرعت در نزدیکی ورودی‌های مماسی،  $31/17$  متر بر ثانیه می‌باشد که با دور شدن از این نواحی، به دلیل اتلافات به تدریج از مقدار آن کاسته می‌شود. کانتور مربوط به سرعت محوری در شکل ۱۰، نشان داده شده است، در این شکل، جهت  $z$ ، جهت مثبت تعیین شده که همان‌طور که مشاهده می‌شود جریان سوخت



(ب) ۰/۱۵ میلی ثانیه

(الف) ۰/۰۵ میلی ثانیه



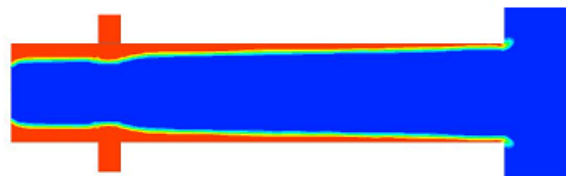
(ت) ۸/۸۵ میلی ثانیه

(پ) ۰/۲ میلی ثانیه

شکل (۶): ورود سوخت از مجاری‌های مماسی در زمان‌های مختلف



(الف) ۰/۲۴ میلی ثانیه



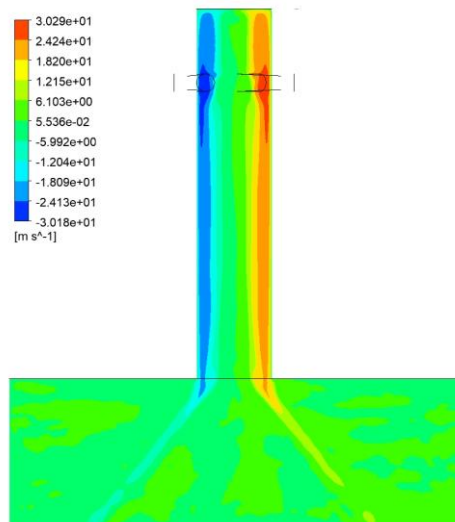
(ب) ۱/۵ میلی ثانیه



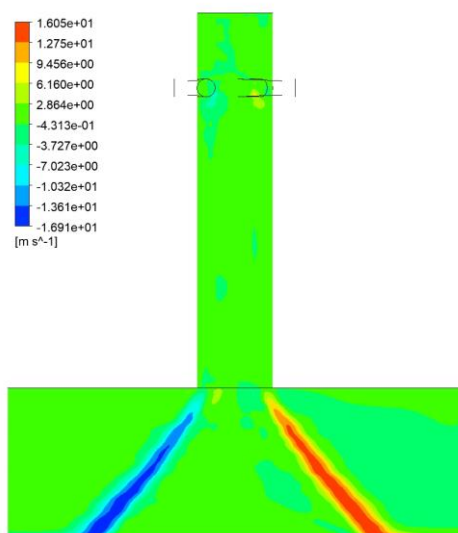
(پ) ۸/۸۵ میلی ثانیه

شکل (۷): موقعیت سوخت در محفظه چرخش در زمان‌های مختلف





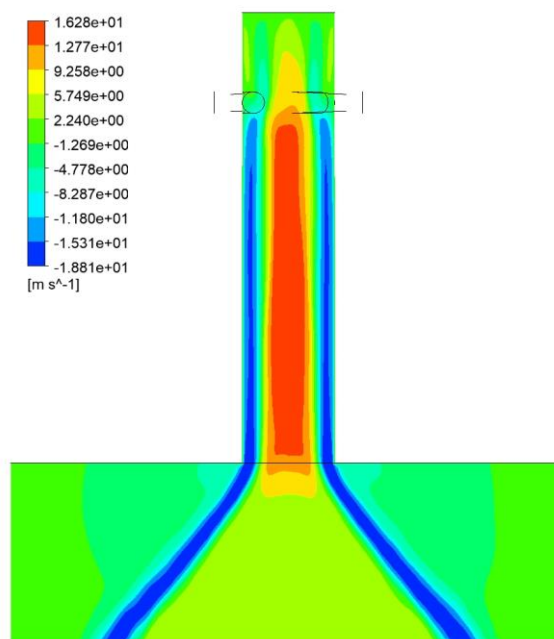
شکل (۱۱): کانتور سرعت مماسی



شکل (۱۲): کانتور سرعت شعاعی

کانتورهای خطوط جریان شکل ۱۳، نحوه تقابل سرعت‌های مماسی و محوری بر هم را نشان می‌دهد، به صورتی که جریان سوخت بعد ورود به داخل محفظه چرخش دارای سرعت مماسی بیشتر بوده که عامل بیشتر بودن قدرت چرخشی در این ناحیه می‌باشد، با فاصله گرفتن از بالادست برآیند سرعت، در راستای محوری بیشتر می‌شود و همچنین می‌توان مشاهده کرد که قدرت چرخندگی در چتر پاشش به کمینه مقدار خود می‌رسد. در شکل ۱۴، نمودارهای سرعت محوری را روی خطوط واقع در فواصل مختلف محور Z در محفظه چرخش، رسم شده است، به عبارت دیگر تغییرات سرعت در طول اتمایزر را نشان می‌دهند.

با دور شدن از قسمت ورودی، به دلیل کاهش چرخندگی، سرعت محوری بیشتری را تجربه می‌کند که حداکثر مقدار آن به ۱۸/۸۱ متر بر ثانیه می‌رسد، این سرعت در ناحیه اسپری به حداکثر مقدار خود رسیده و ثابت می‌ماند. در مرکز هسته هوا، با توجه به فیزیک مسئله که قبلاً بیان شده، همان‌طور که از کانتور سرعت هم برداشت می‌شود سرعت بیشینه ۱۶/۲۸ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد، این سرعت به قطر هسته هوا و در نهایت به قطر محفظه چرخش بستگی دارد. در شکل ۱۱، کانتور سرعت مماسی به نمایش درآمده است. می‌توان کاهش چرخندگی سوخت با دور شدن از مقطع ورودی را در این شکل، مشاهده کرد. همچنین می‌توان دریافت که سرعت چرخش هسته هوا کمتر از سرعت چرخش سوخت می‌باشد و نیز مشاهده می‌شود که سرعت مماسی در چتر پاشش روند کاهشی را دارد.



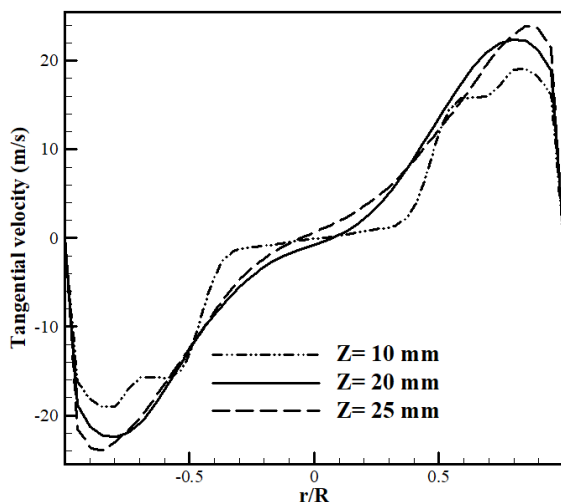
شکل (۱۰): کانتور سرعت محوری

در شکل ۱۲، کانتور سرعت شعاعی را نشان داده شده است. به دلیل وجود دیواره در محفظه چرخش سرعت شعاعی در داخل اتمایزر پایین می‌باشد و در ادامه در قسمت چتر پاشش هم به دلیل عدم وجود دیواره، با دور شدن از دهانه خروجی و ایجاد چتر پاشش افزایش سرعت شعاعی مشاهده می‌شود.



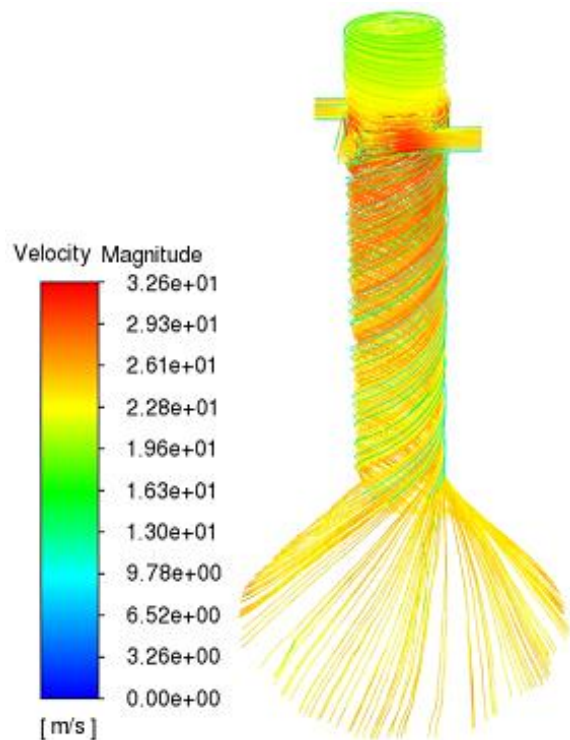
به سرعت صفر را خواهد داشت. سرعت مثبت به این معناست که جریان هوا به سمت داخل اتمایزر در حال حرکت می‌باشد. همچنین با مقایسه سه نمودار تا جایی همان‌طور که در قسمت قبلی بیان شد در نواحی نزدیک به مقاطع ورودی سرعت مماسی بیشتر بوده و رفته‌رفته جهت سرعت به نحوی گشته که از سرعت مماسی کاسته شده و سرعت محوری بیشتر می‌گردد. در وسط اتمایزر جریان گازی در حالت  $Z=20$  بیشینه مقدار را دارد.

برای مقایسه سرعت مماسی هم مشابه قسمت قبلی از مقادیر سرعت مماسی در سه محور با فواصل محوری مختلف مطابق شکل ۱۵، استفاده شد. در این نمودار مشاهده می‌شود که مقدار سرعت چرخشی در  $Z=25$  بیشینه مقدار خود را داشته که با نزدیک شدن به دهانه اوریفیس از مقدار آن کاسته می‌شود. همچنین از این نمودارها برداشت می‌شود که سرعت چرخشی بیشتر در نزدیکی مرز مشترک گاز و مایع وجود داشته و در مرکز محفظه چرخش به حداقل مقدار خود می‌رسد.

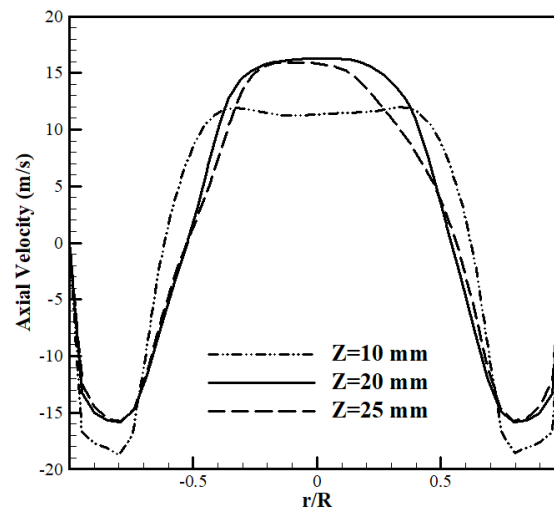


شکل (۱۵): توزیع سرعت مماسی در سه محور افقی در داخل اتمایزر واقع در  $Z$  های مختلف

در نمودار شکل ۱۶، منحنی‌های مقدار سرعت آورده شده است. کاهش سرعت در محدوده مربوط به فیلم سوخت به دلیل اتلافات در طول مسیر جریان تا دهانه اوریفیس قابل مشاهده می‌باشد. در هسته هوا شرایط متفاوت بوده و مقادیر سرعت در موقعیت ۲۰ میلی‌متری بیشتر می‌باشد.

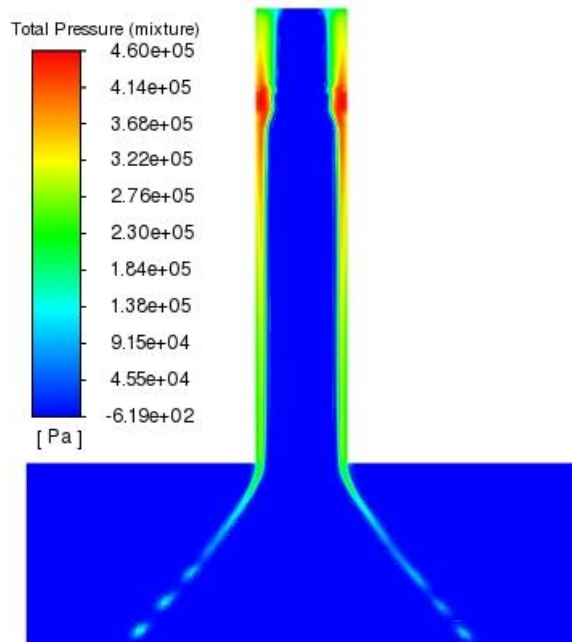


شکل (۱۳): خطوط جریان سوخت



شکل (۱۴): توزیع سرعت محوری در سه محور افقی در داخل اتمایزر واقع در  $Z$  های مختلف

شکل ۱۴ گویای سرعت محوری دو فاز گاز و مایع می‌باشد. بیشینه سرعت منفی مربوط به سرعت سوخت واقع در مقطع مربوط به اوریفیس ( $Z=10$ ) می‌باشد. در لبه دیواره به دلیل شرایط مرزی و ناحیه مرزی سرعت صفر می‌باشد، با دور شدن از دیواره سرعت تا نقطه‌ای مربوط به مرز مشترک سوخت و هوا بیشتر می‌شود بعد آن روند کاهشی تا رسیدن



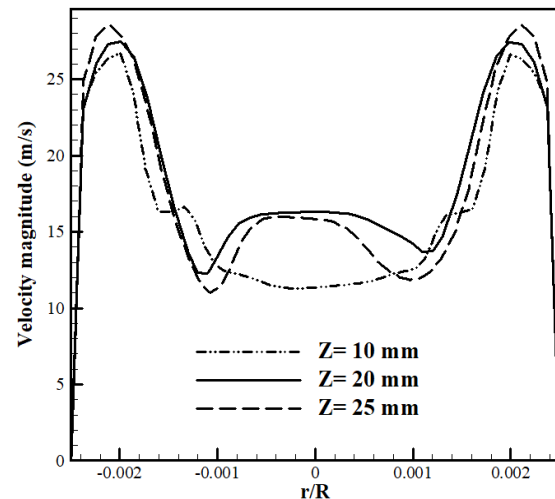
شکل (۱۸): کانتور فشار کل

### ۳-۳- بررسی موقعیت سطح مشترک گاز-مایع در داخل محفظه چرخش

می‌توان با استفاده از محاسبه مقادیر کسر حجمی در طول محفظه چرخش، موقعیت سطح مشترک سوخت و هوا را به دست آورد. کسر حجمی برابر  $0.5$  سطح مشترک در نظر گرفته می‌شود. ضخامت فیلم سوخت در طول محفظه چرخش، شکل ۱۹، به صورت یکنواخت نیست. در انتهای بسته به دلیل وجود دیواره، موجب تجمع سوخت و افزایش ضخامت مایع می‌گردد و در ادامه روند کاهش را نشان می‌دهد. همچنین در دهانه اوریفیس با ایجاد چتر پاشش، کاهش نسبی و سریع ضخامت مشهود است.

### ۳-۴- بررسی ناحیه اسپری و فرایند شکست چتر پاشش

به‌طور کلی می‌توان جریان موجود در اتمایزر را به دو قسمت داخل اتمایزر و خارج از آن تقسیم‌بندی کرد. مدل VoF که برای مدل‌سازی جریان دوفازی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته، با حل معادله کسر حجمی موقعیت سوخت را ردیابی کرده و مشخص می‌کند. با بررسی ناحیه اسپری با استفاده از کانتور حجمی کسر حجمی مشاهده می‌شود که

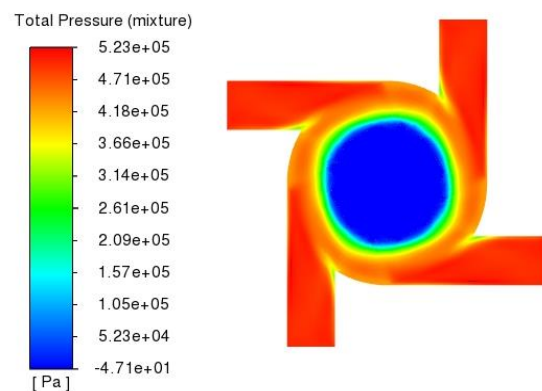


شکل (۱۶): بررسی تغییرات اندازه سرعت داخل محفظه

#### چرخش

در شکل ۱۷ توزیع فشار کل در مقطع مربوط به صفحهی ورودی‌های اتمایزر در آن واقع شده است، نمایش می‌دهد، بیشینه فشار در مقاطع ورودی‌های مماسی با مقدار  $5.23 \times 10^5$  پاسکال و کمینه فشار در وسط سطح مقطع مربوط به هسته هوا با فشار  $-47.1$  پاسکال می‌باشد.

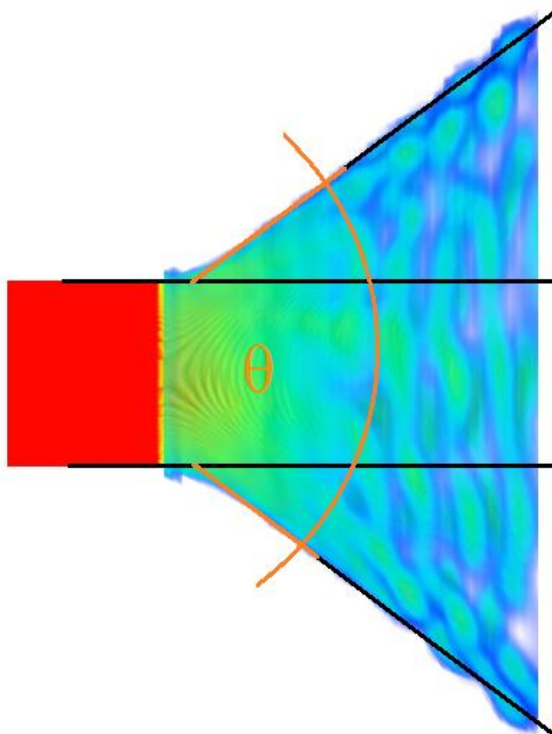
در شکل ۱۸، کانتور فشار کل در صفحهی عمودی YZ نمایش داده شده که مشاهده می‌شود، با دور شدن از مقطع ورودی، به دلایل اصطکاک و جریان لزج، افت فشار محسوسی ایجاد می‌شود، همچنین در ناحیه اسپری تا جایی پیوستگی فشار بالا وجود دارد که مایع هنوز به قطرات و لیگامنت‌ها تجزیه نشده است در ناحیه‌ای که تجزیه رخ داده به‌خوبی در این کانتور مشخص می‌باشد.



شکل (۱۷): کانتور فشار کل در صفحه  $Z=30\text{mm}$



شکل (۲۱): موج‌ها و ناپایداری تشکیل یافته روی چتر پاشش [۲۱]

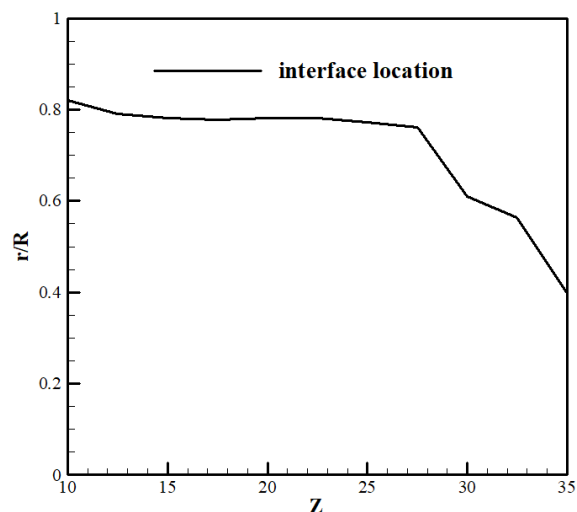


شکل (۲۲): اندازه‌گیری زاویه اسپری

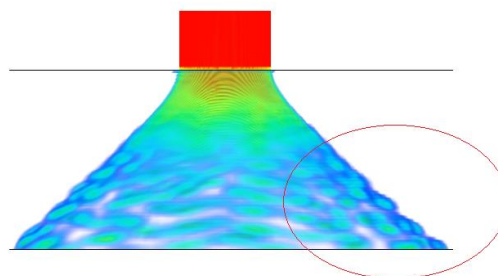
به‌طور خلاصه برخی از مشخصه‌های اسپری به‌دست‌آمده برای اتمایزر موردبررسی، در جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشد.

مدل VoF پیش‌بینی از پدیده شکست با کاهش ضخامت سوخت در چتر پاشش سوخت و تشکیل قطرات و لیگامنت‌ها در جریان اتمایزر فشار-چرخشی را تا حدودی نشان می‌دهد. فو و همکاران [۲۱] بر روی تحلیل رفتار ناپایداری ایجاد روی سطح مشترک مایع و گاز در چتر پاشش، مطالعاتی را انجام دادند که شکل ۲۰، از کار تجربی آن‌ها به‌دست آمده است که موج‌های آن با موج‌های تصویر شبیه‌سازی از روش VOF، شکل ۲۱ مشابهت دارد.

برای بررسی زاویه اسپری در داده‌های استخراج‌شده از حل عددی، می‌توان از موقعیت سوخت در ناحیه اسپری که به قسمت بعد از دهانه اتمایزر که چتر پاشش سوخت در این ناحیه ایجاد می‌شود، بهره گرفت. بدین منظور مطابق شکل ۲۲، با استفاده از حالت حجمی کسر حجمی سوخت، زاویه اسپری محاسبه شد.



شکل (۱۹): بررسی تغییرات موقعیت سطح مشترک در طول محفظه چرخش



شکل (۲۰): ایجاد فرایند شکست در چتر پاشش

## جدول (۲): مشخصه‌های هندسی و عملیاتی اتمایزر

$\Delta P$	$L/D$	زاویه اسپری	دبی جرمی	ضریب تخلیه
(MPa)	(درجه)	(kg/s)	-	-
۰/۵	۵	۷۴/۸	۰/۰۸۵۶	۰/۱۷۰

برای اتمایزر چرخشی فشاری انتهایی باز با نسبت طول به قطر محفظه چرخش برابر پنج به ترتیب برابر ۷۴/۸ و ۰/۱۷ ثبت گردید.

## ۵- فهرست علائم

## علائم انگلیسی

A	مساحت مقطع ورودی [ $m^2$ ]
$C_d$	ضریب تخلیه
$D_p$	قطر ورودی مماسی [m]
$D_s$	قطر محفظه چرخش [m]
$d_o$	قطر اریفیس [m]
$g$	شتاب گرانش [ $m/s^2$ ]
$l_o$	طول اریفیس [m]
$l_p$	طول ورودی مماسی [m]
$L_s$	طول محفظه چرخش [m]
$\dot{M}$	دبی جرمی تئوری [kg/s]
$\dot{m}$	دبی جرمی واقعی [kg/s]
$P_c$	فشار محیط [Pa]
$\Delta P$	اختلاف فشار تزریق [Pa]
$\bar{u}$	بردار سرعت [m/s]
U	سرعت در جهت محور x [m/s]
V	سرعت در جهت محور y [m/s]
W	سرعت در جهت محور z [m/s]

## علائم یونانی

$\alpha$	کسر حجمی [ $m^3/m^3$ ]
$\sigma$	کشش سطحی [N/m]
$\phi$	قطر [m]
$\mu$	ویسکوزیته [kg/m-s]
$\theta$	زاویه اسپری [deg]
$\rho_g$	چگالی هوا [ $kg/m^3$ ]
$\rho_l$	چگالی سوخت [ $kg/m^3$ ]

## ۶- مراجع

[1] Kelesidis GA, Goudeli E, Pratsinis SE. Flame synthesis of functional nanostructured materials and devices: Surface growth and aggregation. Proceedings of the Combustion Institute. 2017;36(1):29-50.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به شبیه‌سازی عددی اتمایزر از نوع فشار-چرخشی انتها باز جهت شبیه‌سازی جریان داخلی اتمایزر و نیز ناحیه تشکیل اسپری پرداخته شده است. شبیه‌سازی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و به کمک مدل حجم سیال و برای مدل جریان لزج از مدل RNG k- $\epsilon$  صورت گرفته است.

در گام نخست به بررسی فرایند پر شدن سوخت در داخل اتمایزر پرداخته شد. به دلیل ابعاد کوچک اتمایزر و شرایط فیزیکی حاکم، فشار تزریق بالا، در زمان بسیار کوتاه این فرایند صورت می‌پذیرد، به صورتی که مشاهده شد ۱/۵ میلی‌ثانیه برای رسیدن سوخت به دهانه اتمایزر و تقریباً ۸ میلی‌ثانیه زمان لازم برای رسیدن به جریان پایدار، زمان به طول انجامید. حساسیت شبیه‌سازی چند فازی، برای جلوگیری از واگرایی حل از گام زمانی بسیار کوچک استفاده گردید. مشاهده شد که استفاده از شبکه سازمان‌یافته برای شبیه‌سازی جریان داخلی اتمایزر دقت لازم برای استفاده از تعداد مش کمتر و به همراه آن کاهش هزینه محاسبات را به همراه داشت.

در بررسی هیدرودینامیک جریان، جریان چرخشی ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد جریان هسته هوا به دلیل افت فشار حاصله از سرعت جریان چرخشی سوخت ایجاد گردیده که حداکثر سرعت هسته هوا در موقعیتی پایین‌تر از قسمت ورودی سوخت قرار دارد. همچنین مشاهده شد که سوخت بعد وارد شدن به محفظه چرخش دارای بیشترین سرعت مماسی را دارا بوده که در حرکت به سمت خارج از اتمایزر، به دلیل تغییر جهت جریان، این سرعت کمتر شده و سرعت محوری افزوده می‌شود. در بررسی ناحیه اسپری قابلیت مدل VoF در شکست چتر پاشش و ایجاد لیگامنت‌ها و همچنین موج‌های ایجاد روی فیلم سوخت، مشاهده گردید. زاویه اسپری و ضریب تخلیه

- [15] Liu J, Li Q-L, Liu W-D, Wang Z-G. Experiment on liquid sheet breakup process of pressure swirl injector. *Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology*. 2011;32(4).
- [16] Amini G. Liquid flow in a simplex swirl nozzle. *International Journal of Multiphase Flow*. 2016;79:225-35.
- [17] Ma PC, Esclape L, Carbajal S, Ihme M, Buschhagen T, Naik SV, et al., editors. High-fidelity simulations of fuel injection and atomization of a hybrid air-blast atomizer. 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting; 2016.
- [18] Rivas JRR, Pimenta AP, Salcedo SG, Rivas GAR, Suazo MCG. Study of internal flow of a bipropellant swirl injector of a rocket engine. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2018;40(6):1-16.
- [19] Ommi F, Azimi M. Most effective combustion technologies for reducing Nox emissions in aero gas turbines. *The International Journal of Multiphysics*. 2012;6(4):417-24.
- [20] Chen C, Tang Z. Investigation of the spray formation and breakup process in an open-end swirl injector. *Science Progress*. 2020;103(3):0036850420946168.
- [21] Fu Q-f, Yang L-j, Qu Y-y, Gu B. Linear stability analysis of a conical liquid sheet. *Journal of Propulsion and Power*. 2010;26(5):955-68.
- [2] Lefebvre AH, Ballal DR. Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions: CRC press; 2010.
- [3] Kumar A, Sahu S. Liquid jet breakup unsteadiness in a coaxial air-blast atomizer. *International journal of spray and combustion dynamics*. 2018;10(3):211-30.
- [4] Lefebvre AH, McDonell VG. Atomization and sprays: CRC press; 2017.
- [5] Fansler TD, Parrish SE. Spray measurement technology: a review. *Measurement Science and Technology*. 2014;26(1):012002.
- [6] Czernek K, Hyrycz M, Krupińska A, Matuszak M, Ochowiak M, Witczak S, et al. State-of-the-art review of effervescent-swirl atomizers. *Energies*. 2021;14(10):2876.
- [7] Liu Z, Huang Y, Sun L. Studies on air core size in a simplex pressure-swirl atomizer. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017;42(29):18649-57.
- [8] Nouri-Borujerdi A, Kebriaee A. Numerical simulation of laminar and turbulent two-phase flow in pressure-swirl atomizers. *AIAA journal*. 2012;50(10):2091-101.
- [9] Zhang T, Dong B, Chen X, Qiu Z, Jiang R, Li W. Spray characteristics of pressure-swirl nozzles at different nozzle diameters. *Applied thermal engineering*. 2017;121:984-91.
- [10] Galbiati C, Ertl M, Tonini S, Cossali GE, Weigand B. DNS investigation of the primary breakup in a conical swirled jet. *High Performance Computing in Science and Engineering' 15: Springer*; 2016. p. 333-47.
- [11] Fuster D, Bagné A, Boeck T, Le Moyne L, Leboissetier A, Popinet S, et al. Simulation of primary atomization with an octree adaptive mesh refinement and VOF method. *International Journal of Multiphase Flow*. 2009;35(6):550-65.
- [12] Halder M, Dash S, Som S. Influences of nozzle flow and nozzle geometry on the shape and size of an air core in a hollow cone swirl nozzle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2003;217(2):207-17.
- [13] Halder M, Som S. Numerical and experimental study on cylindrical swirl atomizers. *Atomization and Sprays*. 2006;16(2).
- [14] Moon S, Abo-Serie E, Bae C. Liquid film thickness inside the high pressure swirl injectors: Real scale measurement and evaluation of analytical equations. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010;34(2):113-21.



## Numerical Study of the Effect of Spray Geometric Parameters on Fuel Flow and Air Core in Open-end Pressure-swirl Atomizer

Mohammad Moradi<sup>1</sup>, Saeed Karimian Aliabadi<sup>2\*</sup>, Fathollah Ommi<sup>3</sup>, Mahdi Sarhaddi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

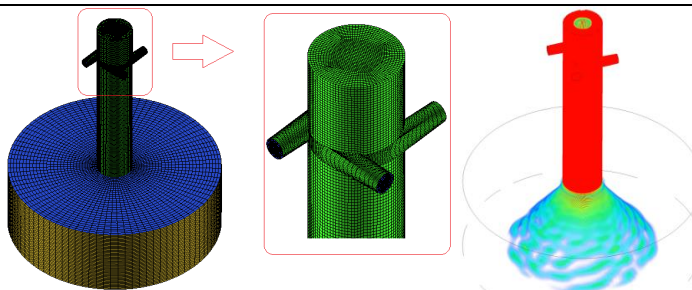
<sup>3</sup> Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>4</sup> M.Sc., Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

### HIGHLIGHTS

- Numerical study of the atomizer
- Parametric investigation of the geometric variables
- Flow behavior study

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

#### Article history:

Article Type: Research paper

Received: 24 January 2022

Received in revised form: 12 March 2022

Accepted: 17 April 2022

Available online: 28 June 2022

\*Correspondence:

karimian@modares.ac.ir

#### How to cite this article:

M. Moradi, S.K. Aliabadi, F. Ommi, M.Sarhadi. Numerical study of the effect of spray geometric parameters on fuel flow and air core in open-end pressure-swirl atomizer. Journal of Aerospace Mechanics. 2022; 18(3):127-140.

#### Keywords:

RNG

Turbulence model

Open-end pressure-swirl atomizer

Gas turbine

Numerical study

### ABSTRACT

In this research, the internal flow of open-end pressure-swirl atomizer, which has many applications in gas turbine engines and space propulsion, is investigated numerically. A multi-phase fluid volume model is used to simulate the internal flow of the atomizer. Also, due to the nature of the rotational flow inside the atomizer, the RNG  $k-\epsilon$  turbulence model was used. Structured mesh has been used to achieve better results. In this research, spray parameters such as liquid film thickness, spray cone angle, discharge coefficient and velocity and pressure distribution contours have been studied. Simulation of an open-end atomizer with an  $L/D = 5$  ratio, as well as the use of a structured mesh and the inclusion of kerosene fuel to create conditions close to the operation of a gas turbine, are among the things that differentiate the present study from other studies. The results also show that at a pressure of 0.5 MPa, the time required to reach the fuel in the atomizer used is less than 1.5 milliseconds and the failure of the to spray cone and turn into larger droplets can be observed. The spray angle and discharge coefficient for the studied atomizer were 74.8 and 0.17, respectively.





