

حل عددی جریان داخلی و تعیین عوامل عملکردی انژکتورهای پیچشی مماسی انتها-باز و انتها-همگرا

جواد منصوری زاده^۱، علی میر محمدی^۲

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، a.mirmohammadi@sru.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۴

چکیده

انژکتورهای پیچشی مماسی انتها-باز و انتها-همگرا به صورت گسترده در موتورهای درونسوز مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع از انژکتورهای پیچشی فشاری شامل: ورودی‌های مماسی، محفظه چرخش، بخش همگرا و اوریفیس خروجی هستند. در این مقاله شبیه‌سازی و مقایسه جریان سیال در داخل انژکتور انتها-باز و انتها-همگرا برای پاشش سوخت کروسین در شرایط عملیاتی یکسان با استفاده از روش حجم سیال (VOF) انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های وابسته به زمان (ناپایا) نشان دادند، زمان خروج کروسین از انژکتور انتها-باز $1/8$ میلی‌ثانیه و در انژکتور انتها-همگرا 4 میلی‌ثانیه است. نتایج شبیه‌سازی‌های مستقل از زمان (پایا) در فشارهای تزریق مختلف نشان دادند، انژکتور انتها-باز در فشار تزریق 0.05 MPa به حالت پایدار می‌رسد در حالی که انژکتور انتها-همگرا در فشار تزریق 0.3 MPa به حالت پایدار خود می‌رسد. اما سرعت خروج کروسین در انژکتور انتها-باز به مراتب از انژکتور انتها-همگرا کمتر است که این امر، موجب کاهش نیروی ایرودینامیکی وارد شده به لایه سوخت خروجی از انژکتور شده و باعث کاهش اتمیزاسیون سوخت در انژکتور انتها-باز در مقایسه با انژکتور انتها-همگرا می‌شود.

واژگان کلیدی

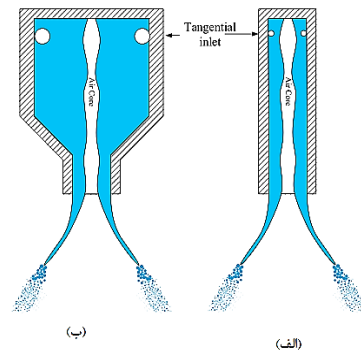
انژکتور پیچشی مماسی، انژکتور انتها-همگرا، انژکتور انتها-باز، شبیه‌سازی، VOF، کروسین.

۱. مقدمه

موتورهایی با آلاینده‌های کمتر وادار کرده است [۱]. مهم‌ترین بخش در موتورهای احتراقی به منظور کاهش آلاینده‌ها، فرایند احتراق و زیر بخش‌های فرایند احتراق یعنی اتمیزاسیون و پاشش سوخت می‌باشد. بازده و میزان تولید آلاینده، وابسته به این دو عامل اصلی احتراق می‌باشد. عمل اتمیزاسیون^۱ و پاشش^۲ در

موضوع آلاینده‌های محیط زیست و کمبود منابع انرژی در سال‌های اخیر همواره در کانون توجه دانشمندان و محققان در سراسر دنیا بوده است. با آغاز قرن بیستم و استفاده هر چه بیشتر از موتورهای درونسوز، مسئله کاهش آلاینده‌ها و گرم شدن تدریجی زمین تولید کنندگان موتورهای احتراقی را به تولید

موتورهای احتراقی توسط انژکتور صورت می‌گیرد، لذا هر انژکتوری باید فرایند اتمیزاسیون و اختلاط را به خوبی انجام دهد [۲ و ۳]. انژکتورهای پیچشی مماسی^۳ به علت مزایایی که دارند، امروزه به صورت گسترده در صنایع مختلف از جمله: موتور راکت‌های سوخت مایع، توربین‌های گازی، موتورهای درونسوز پیستونی، کشاورزی، داروسازی، خشک‌کن‌ها و سایر صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به حساسیت کاری در صنایع هوافضا، به علت کارایی بالای این انژکتور در راکت‌های مهم و کاربردی مثل RD-214 و RD-170 مورد استفاده قرار گرفته است. گسترش وسیع استفاده از انژکتورهای پیچشی مماسی به علت سادگی در ساختار، قابل اطمینان بودن و تاثیر بهینه آن‌ها در اتمیزاسیون سیالات و همچنین دستیابی به چتر پاشش مناسب در آنها است [۲، ۴]. در این پژوهش انژکتور پیچشی مماسی با دو نوع هندسه انتها-باز^۴ و انتها-همگرا^۵ مورد مطالعه قرار می‌گیرند [۳]. شکل ۱ شماتیک این دو نوع انژکتور پیچشی مماسی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. انژکتور پیچشی مماسی (الف) نوع انتها-باز (ب) نوع انتها-همگرا [۳].

عواملی از قبیل: اتمیزاسیون، زاویه اسپری، طول شکست^۶ و ضخامت لایه سیال، به شدت جریان داخل انژکتور پیچشی مماسی وابسته هستند. از اولین کارهای انجام شده در مورد مطالعه جریان داخلی می‌توان به کار تیلور اشاره کرد [۵]. تیلور از تئوری لایه مرزی برای تعیین مشخصه جریان در داخل اوریفیس انژکتور فشاری پیچشی استفاده کرد. وی ادعا نمود، جریان لایه مرزی فضای دهانه خروجی انژکتور را دربر می‌گیرد و استفاده از تئوری پتانسیل در اوریفیس و ناحیه همگرایی، دقت کافی ندارد. دوماس و لستر تحقیقات آزمایشگاهی زیادی برای بدست آوردن معادلات تجربی روی بیشتر از ۶۰ تعداد انژکتور پیچشی مماسی که

محدوده وسیعی از ابعاد داخلی انژکتور را در بر می‌گرفت، انجام دادند [۶]. آنها متوجه شدند، صفحه مخروطی سیال که در اوریفیس انتهای انژکتور تولید می‌گردد کاملاً توخالی است و این دو مشخصه عملکردی ضریب تخلیه^۷ و زاویه پاشش، کاملاً به هندسه انژکتور وابسته هستند. دوموچل و همکاران [۷] در مورد شبکه‌بندی کل لایه مرزی در اوریفیس انتهای انژکتور پیچشی مماسی تحقیقات بسیاری انجام داده‌اند. آنها متوجه شدند که تحلیل تیلور در مورد پیشگویی نرخ تخلیه با اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط دوماس و لستر تفاوت دارد و نشان دادند که ضخامت لایه مرزی و دبی جریان داخل انژکتورهای پیچشی مماسی هر دو تابعی از طراحی نازل و فشار پاشش می‌باشند [۵] و [۶]. فرآیند شکل‌گیری حفره هوا و توسعه آن با زمان درون یک انژکتور پیچشی مماسی انتها-همگرا به صورت تجربی و عددی توسط دش و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت [۸]. آزمایش‌ها با نازل‌های شیشه‌ای و آب انجام شده است. شبیه‌سازی با استفاده از روش حجم سیال^۸ (VOF) به صورت دو بعدی تقارن محوری^۹ با شبکه‌بندی بی‌سازمان^{۱۰} صورت گرفته است. نتایج نشان دادند، شکل حفره هوا و زاویه پاشش به خوبی شبیه‌سازی شده و با نتایج تجربی مطابقت دارد. ماندال و همکارانش با استفاده از شبیه‌سازی به روش حجم سیال (VOF) به بررسی تاثیر مقدار شاخص توانی^{۱۱} (n) و ثابت مشخصه هندسی انژکتور^{۱۲} بر عملکرد انژکتور پیچشی مماسی انتها-همگرا پرداختند [۹]. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ایشان نشان دادند در یک مشخصه هندسی ثابت، ضخامت لایه سیال خروجی از انژکتور و ضریب تخلیه سیال شبه پلاستیک^{۱۳} کمتر از سیال دیلاتنت^{۱۴} و زاویه پاشش سیال شبه پلاستیک بیشتر از سیال دیلاتنت است.

حسینعلی‌پور و همکاران نیز به طراحی و شبیه‌سازی یک نمونه انژکتور پیچشی مماسی انتها-همگرا پرداختند [۱۰]. ایشان از مدل آشفتگی کا-اپسیلون^{۱۵} برای پیش‌بینی رفتار سیال در داخل انژکتور استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی وجود هسته هوا و جریان برگشتی در اوریفیس انژکتور را به خوبی نشان می‌دهد. همچنین ضخامت لایه سیال در طول نازل انژکتور ثابت نبوده و در ابتدای نازل بیشتر است و به تدریج که به دهانه خروجی نازل نزدیکتر می‌شود، نازکتر است. امی و همکاران تاثیر ویسکوزیته مایع و سرعت چرخش سیال بر فرایند اتمیزاسیون در یک انژکتور دو سیاله را بررسی کردند [۱۱]. ایشان نشان دادند با افزایش

۲. شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی عددی شامل بخش‌های مختلفی است که در این بخش تعریف و شرح آن‌ها ارائه شده است.

۲-۱. معادلات حاکم

معادلات حاکم برای جریان دو فازی در انژکتور پیچشی مماسی معادلات بقای جرم یا پیوستگی (معادله ۱) و مومنتوم یا ناوبر استوکس (معادله ۲) هستند. در مدل VOF مقدار کسر حجمی هر فاز در هر سلول محاسباتی توسط معادله دیگری تحت عنوان معادله کسر حجمی (معادله ۳) محاسبه می‌شود.

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (2\mu D) + g + \frac{1}{\rho} F_b \quad (2)$$

$$f(x, t) = \begin{cases} 0 & \text{In gas} \\ 0 < f < 1 & \text{at the gas - liquid interface} \\ 0 & \text{In liquid} \end{cases} \quad (3)$$

در معادلات (۱) و (۲)، μ ، U ، P و ρ به ترتیب، بردار سرعت، ویسکوزیته سیال، مقدار فشار و چگالی هستند. پارامتر g شتاب گرانش بوده و F_b بیانگر نیروی تنش سطحی که تنها در سطح مشترک دو سیال رخ می‌دهد را نشان می‌دهد. D تانسور تنش (تغییر شکل) می‌باشد. در معادله (۳)، t زمان و x شماره گره^{۱۸} در مدل عددی است.

۲-۲. هندسه حل

به علت نوع جریان سه‌بعدی در داخل انژکتورهای پیچشی مماسی انتها-باز و انتها-همگرا، برای مدل‌سازی آن از یک مدل دوبعدی متقارن محوری با در نظر گرفتن چرخش استفاده می‌شود. به علت ماهیت حل دو بعدی متقارن محوری تعداد کانال‌های ورودی در یک انژکتور واقعی باید با مقدار متناظر آن در روش دو بعدی متقارن محوری جایگزین گردد. عرض قسمت ورودی و همچنین محاسبه سرعت مماسی (u_t) و سرعت شعاعی (u_r) با استفاده از معادله ممنتوم زاویه‌ای و دبی جرمی کلی سیال در ابتدای محفظه چرخش بدست می‌آید. مقدار سرعت مماسی با معادله (۴) و مقدار سرعت شعاعی با معادله (۵) در ورودی دامنه حل محاسبه می‌شود.

$$u_t = \frac{\dot{m} D_s - d_p}{\rho A_p D_s} \quad (4)$$

$$u_r = \frac{\dot{m}}{\rho \pi D_s (l_{inlet})} \quad (5)$$

ویسکوزیته سیال طول شکست اولیه^{۱۶} افزایش و با افزایش سرعت چرخش، ناپایداری افزایش و طول شکست کاهش می‌یابد. اخیراً در یک مطالعه جدید که توسط فی انجام شده است، تأثیر فشار محیط تخلیه بر روی انژکتور پیچشی مماسی انتها-باز بررسی شده است [۱۲]. نتایج این شبیه‌سازی نشان داده است که پروفایل سرعت محوری مستقل از فشار محیط تخلیه است در حالی که زاویه پاشش با افزایش فشار محیط تخلیه در برخی موارد کاهش پیدا می‌کند. رازقی و همکاران رفتار اسپری انژکتور پیچشی مماسی نوع انتها-باز را به دو روش عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند [۱۳]. در این مطالعه مشاهدات تجربی به دست آمده از روش‌های پراکندگی میا و لیف^{۱۷} نشان می‌دهد که چهار ناحیه با تراکم بالا از سیال در محیط پاشش شکل گرفته است. لاوریل و همکاران شبیه‌سازی عددی تأثیر رفتار جریان سیال با ویسکوزیته بالا (۱۹۲ میلی پاسکال ثانیه) در محدوده عدد رینولدز ورودی ۹۰۶-۶۰۴ در انژکتور پیچشی مماسی را انجام دادند. نتایج به دست آمده توسط ایشان نشان دادند در این محدوده عدد رینولدز ورودی، زاویه پاشش بین ۶۲-۴۵ درجه و ضریب تخلیه در محدوده ۰/۶۴-۰/۵۷ متغیر است [۱۴]. سون و همکاران با استفاده از حل عددی عملکرد انژکتور پیچشی-مارپیچی در فشارهای مختلف را ارزیابی کردند. ایشان نشان دادند با افزایش فشار ورودی سرعت و دبی جریان افزایش می‌یابد اما در برخی نواحی به علت کاهش زیاد فشار، پدیده کاویتاسیون نیز مشاهده می‌شود که عملکرد انژکتور را دچار اختلال می‌کند [۱۵].

با توجه به مطالب گفته شده می‌توان نتیجه گرفت، نه در زمینه عددی و نه تجربی، مطالعه‌ای در خصوص مقایسه رفتار جریان سیال و عوامل عملکردی از قبیل زاویه پاشش، سرعت‌های خروجی و ضخامت لایه سیال مایع در داخل دو انژکتور پیچشی مماسی انتها-باز و انتها-همگرا انجام نشده است. لذا در این مقاله با انجام شبیه‌سازی‌های عددی در شرایط عملکردی یکسان در حالت پایا و ناپایا جریان داخل انژکتور پیچشی مماسی انتها-باز و انتها-همگرا بررسی و مقایسه می‌شود، تا علاوه بر معرفی تفاوت‌های عملکردی و جریانی این دو انژکتور بهترین نقطه عملکرد این دو انژکتور شناسایی شود تا در صورت لزوم انتخاب یکی از این دو انژکتور با توجه به شرایط عملیاتی بهترین انژکتور انتخاب گردد.

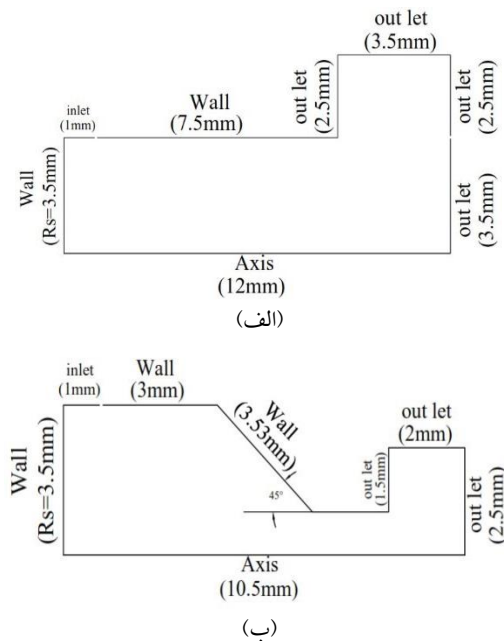
در معادلات فوق، (D_s) قطر محفظه چرخش انژکتور، (m) دبی جرمی عبوری، (ρ) دانسیته سیال و (A_p) سطح مقطع موثر روزنه‌های ورودی، (l_{inlet}) طول ناحیه ورودی در شبیه‌سازی دو بعدی و (d_p) قطر روزنه ورودی به انژکتور است [۱۶، ۱۲]. دامنه حل، ابعاد هندسی و نوع مرزها در انژکتور پیچشی مماسی انتها-باز و انتها-همگرا به ترتیب در (شکل ۲-الف) و (شکل ۲-ب) نشان داده شده است. در این پژوهش شرایط مرزی برای شبیه‌سازی دو بعدی و تقارن محوری همراه با چرخش (شکل ۲)، دیواره، محور تقارن، ورودی جریان و فشار در خروج در نظر گرفته شده است. برای شرط مرزی دیواره شرط عدم لغزش لحاظ شده است.

۲-۴. استقلال از شبکه محاسباتی

شبکه‌بندی‌هایی به تعداد ۴۵۷۵ ($dx=0.0001$)، ۸۱۸۰ ($dx=0.00005$) و ۱۸۳۷۰ ($dx=0.000025$) انجام شده است. همانطور که در شکل ۳ شبکه‌بندی مشاهده می‌شود، کسر حجمی کروسیں^{۲۹} در اوریفیس انژکتور پیچشی مماسی انتها-همگرا در شبکه‌بندی به تعداد ۸۱۸۰ با شبکه‌بندی ۱۸۳۷۰ خیلی نزدیک می‌باشد. لذا تعداد سلول‌های محاسباتی در انژکتور انتها-همگرا ۸۱۸۰ و انژکتور انتها-باز ۱۲۱۰۰ انتخاب می‌شود. شبکه‌بندی هندسه‌های طراحی شده در شکل ۴ نشان داده شده است.

۲-۵. اعتبار سنجی

برای اطمینان از صحت نتایج به دست آمده از تحلیل‌های عددی، ارزیابی روش مورد استفاده و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی در دسترس، امری بسیار مهم می‌باشد. در این پژوهش شبیه‌سازی‌های دوبعدی برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی که مربوط به یک نوع از انژکتورهای پیچشی مماسی انتها-همگرا انجام پذیرفته و سپس همان مدل‌ها به صورت دوبعدی شبیه‌سازی شده و تمامی نتایج با هم مقایسه شده‌اند. انژکتور پیچشی مماسی انتها-همگرا در این بخش دارای قطر محفظه چرخش برابر با ۷ میلی‌متر، قطر اوریفیس ۲ میلی‌متر و زاویه همگرایی ۴۵ درجه است. نتایج به دست آمده از روش شبیه‌سازی به روش حجم سیال در حالت عملکرد پایایی انژکتور پیچشی مماسی انتها-همگرا و داده‌های آزمایشگاهی از مرجع [۱۷] در جدول ۱ نشان داده شده است. با مقایسه نتایج مشاهده می‌شود که خطا برای مقدار دبی خروجی آزمایشگاهی و مقدار به دست آمده از روش عددی در فشارهای پاشش ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱



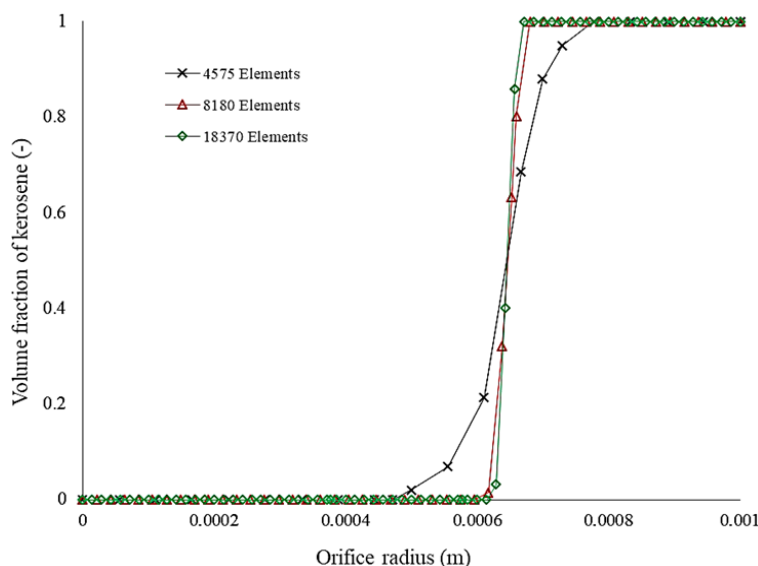
شکل ۲. دامنه و ابعاد انژکتور (الف) انتها-باز (ب) انتها-همگرا.

۲-۳. روش عددی

نرم افزار فلوئنت^{۱۹} برای حل عددی جریان داخل انژکتور پیچشی مماسی انتها-باز و انتها-همگرا و از مدل حجم سیال استفاده شده است. برای حل معادلات پیوستگی و مومنتوم، از روش عددی حل کننده بر اساس فشار^{۲۰} و با الگوریتم مجزا^{۲۱}، استفاده شده است. برای محاسبه مقدار فشار از روش گسسته سازی PRESTO^{۲۲} استفاده شده است. زیرا این طرح برای مسائلی با جریان‌های چرخشی، طرح مناسبی می‌باشد. طرح بالادست مرتبه‌ی دوم^{۲۳} برای گسسته سازی معادلات مومنتوم و انرژی جنبشی توربولانس^{۲۴} و نرخ اتلاف^{۲۵}، استفاده شده است. زیرا هنگامی که جریان از خطوط شبکه‌بندی به صورت مورب، عبور کند، طرح

و ویسکوزیته دینامیکی $0.0024 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ به عنوان سیال عامل به کار رفته است، در شبیه‌سازی‌های این پژوهش از داده‌های این مرجع استفاده شده است.

مگاپاسکال زیر ۵ درصد است. لازم به ذکر است با توجه به اینکه در مرجع [۱۷] سوخت کروسین در شرایط ترمودینامیکی ۲۵ درجه سانتی‌گراد با دانسیته 800 kg/m^3 کشش سطحی 0.027 N/m



شکل ۳. استقلال از تعداد سلول‌های محاسباتی.

۳. تحلیل نتایج

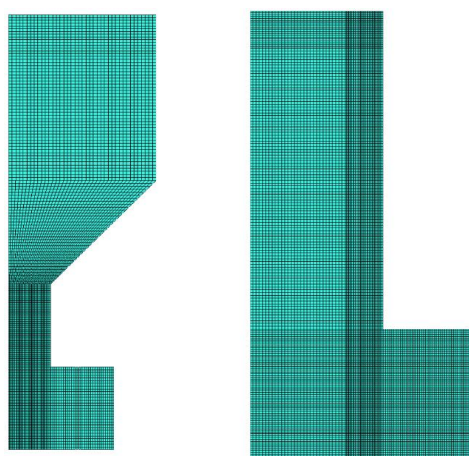
با توجه به اینکه شبیه‌سازی‌ها در دو بخش ناپایا و پایا انجام شده است، نتایج در دو بخش تحلیل جریان گذار و پایا مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱. تحلیل جریان گذار

به منظور ارزیابی و مقایسه رفتار جریان سیال کروسین در انژکتور پیچشی مماسی انتها-باز و انتها-همگرا در زمان‌های مختلف، با شبیه‌سازی جریان ناپایا برای هر دو انژکتور انجام شده است که در ادامه تفاوت‌های این دو انژکتور بررسی شده است.

۳-۱-۱. انژکتور انتها-همگرا

نتایج حل ناپایای انژکتور انتها-همگرا در شکل ۵ نشان می‌دهد که با گذشت زمان رفتار جریان در داخل انژکتور تغییرات زیادی دارد. کانتور کسر حجمی در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد، با گذشت زمان حفره هوا در داخل انژکتور کاملتر می‌شود و در زمان $7/68$ میلی‌ثانیه هسته هوا به صورت کامل تا انتهای انژکتور توسعه می‌یابد. اما نکته بسیار مهم و حائز اهمیت در کانتور کسر حجمی کروسین این است که قطر هسته هوا در راستای محور



(الف) (ب)

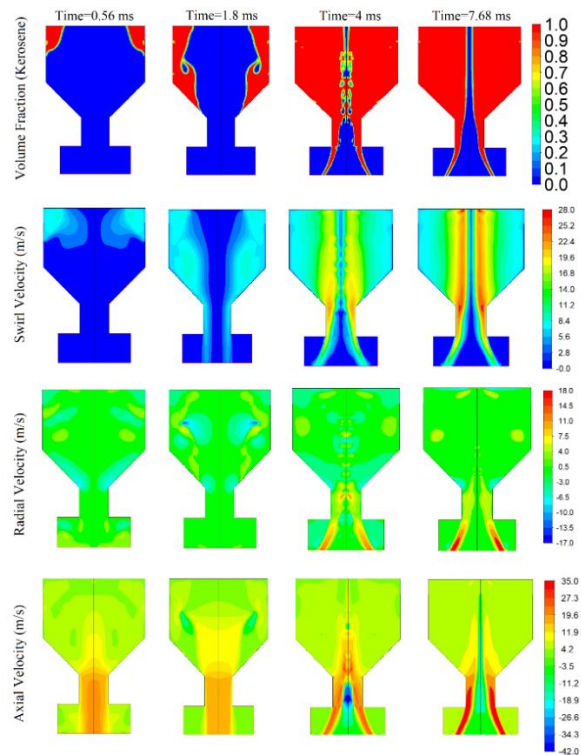
شکل ۴. شبکه‌بندی دامنه حل الف) انتها-باز ب) انتها-همگرا.

جدول ۱. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی دبی خروجی از انژکتور پیچشی مماسی انتها-همگرا.

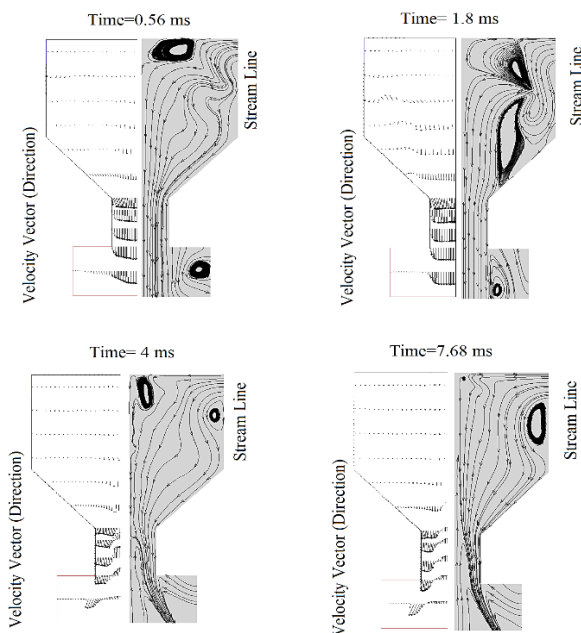
خطا	\dot{m}_{num}	\dot{m}_{exp}	فشار تزریق
%	kg/s	kg/s	MPa
۴/۹۱	۰/۰۲۶	۰/۰۲۸	۰/۳
۳/۶۲	۰/۰۳۳	۰/۰۳۵	۰/۵
۳/۰۶	۰/۰۳۹	۰/۰۴	۰/۷
۳/۶۰	۰/۰۴۵	۰/۰۴۷	۱

انژکتور به سمت خروجی افزایش می‌یابد و در اوریفیس خروجی از انژکتور به بیشترین مقدار خود می‌رسد. با نگاهی بر کانتورهای سرعت مماسی و شعاعی می‌توان گفت دو عامل مهم باعث ایجاد چنین رخدادی می‌شود [۱۸]: ۱- سرعت مماسی که عامل اصلی ایجاد چرخش سیال در محفظه چرخش انژکتور است. با حرکت از دیواره‌ها به سمت محور انژکتور، سرعت مماسی افزایش پیدا می‌کند و در اوریفیس انژکتور به بیشترین مقدار خود می‌رسد. لذا موجب حرکت سیال به سمت دیواره‌ها می‌شود. ۲- با نگاهی دقیق‌تر به کانتورها مشخص می‌شود که بعد از ناحیه همگرا، سرعت شعاعی افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر افزایش سرعت شعاعی موجب حرکت سیال به سمت دیواره‌های اوریفیس می‌شود. بنابراین این دو عامل باعث حرکت کروسین به سمت دیواره‌های انژکتور شده و باعث افزایش قطر هسته هوا در اوریفیس می‌شود.

با گذشت زمان و ایجاد جریان معکوس هوا به سمت داخل انژکتور، جهت بردار سرعت و خطوط جریان در اوریفیس انژکتور در نزدیکی محور انژکتور تغییر می‌کند. پدیده دیگری که در شکل ۶ قابل مشاهده است، محل تشکیل گردابه‌ها و نحوه حرکت آن‌ها با گذشت زمان است. در حالت کلی می‌توان گفت که گردابه‌ها در ۲ ناحیه شکل گرفته‌اند ۱- داخل انژکتور و ۲- بیرون از انژکتور. گردابه داخل انژکتور در ابتدا نزدیک محور انژکتور شکل می‌گیرد. اما با گذشت زمان این گردابه از محور انژکتور به سمت دیواره کناری نزدیک ورودی جریان کروسین حرکت می‌کند و در مقابل گردابه شکل گرفته در بیرون از انژکتور، که در ابتدا دورتر از محور انژکتور شکل گرفته است، با گذشت زمان به سمت محور انژکتور حرکت می‌کند. علت حرکت هر دو گردابه با گذشت زمان ایجاد فشار منفی در محور انژکتور و شکل‌گیری هسته هوا می‌باشد. نتایج به دست آمده توسط لاوربلا و همکاران [۱۴] نیز نشان از حرکت سیال به سمت دیواره‌ها با افزایش عدد رینولدز ورودی دارد که این دو از حرکت چرخشی سیال ناشی می‌شود.



شکل ۵. کانتورهای کسر حجمی، سرعت چرخشی، شعاعی و محوری در زمان‌های ۰/۵۶، ۱/۸، ۴ و ۷/۶۸ ms.



شکل ۶. بردارهای سرعت و خطوط جریان سیال در زمان‌های ۰/۵۶، ۱/۸، ۴ و ۷/۶۸ ms.

۳-۱-۲. انژکتور انتها-باز

همانطور در شکل ۷ مشاهده می‌شود، کسر حجمی کروسین با سرعت چرخشی و شعاعی وارد انژکتور می‌شود و به علت داشتن سرعت مماسی از نواحی نزدیک به دیواره انژکتور به سمت

با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که با ورود کروسین به داخل انژکتور، هوای داخل انژکتور به سمت بیرون حرکت می‌کند، جهت بردار سرعت و خطوط جریان در اوریفیس انژکتور در زمان‌های ۰/۵۶ و ۱/۸ میلی‌ثانیه نشان دهنده این پدیده می‌باشند.

شکل ۸ جهت بردار سرعت و خطوط جریان (کروسین و هوا) در انژکتور انتها-باز را نشان می‌دهد. با توجه به جهت بردار سرعت می‌توان نتیجه گرفت با گذشت زمان به علت چرخش سیال، ناحیه فشار منفی ایجاد می‌شود و موجب مکش هوا از خروجی انژکتور به سمت داخل انژکتور می‌شود. این موضوع در کانتور سرعت محوری به وضوح قابل مشاهده است. اما نکته قابل توجهی که مشاهده می‌شود، این است که به علت بزرگ بودن قطر اوریفیس انژکتور و کم بودن سرعت جریان سیال و در نتیجه کم بودن قدرت جریان خروجی از انژکتور، جریان معکوس در انژکتور انتها-باز به مراتب زودتر از انژکتور انتها-همگرا شکل می‌گیرد. همچنین به علت عدم تغییر در سرعت شعاعی در طول انژکتور، خطوط جریان و نحوه مکش هوا به داخل انژکتور در ثانیه‌های ۴ و ۶ میلی‌ثانیه تغییر چندانی در خطوط جریان شکل نمی‌گیرد. به عبارت دیگر جریان در زمان کم به حالت پایدار خود می‌رسد. از جمله تفاوت‌های بین زمان ۴ و ۶ میلی‌ثانیه اندازه بردار سرعت و کانتور سرعت محوری است. با مقایسه همزمان کانتور سرعت محوری و بردار سرعت می‌توان نتیجه گرفت، اندازه بردار سرعت به علت بزرگتر شدن سرعت محوری منفی به سمت داخل انژکتور بزرگتر می‌شود و هوای محیط با سرعت بیشتری به داخل انژکتور کشیده می‌شود. با نگاهی دقیق به خطوط جریان کاملاً واضح است، گردابه‌های شکل گرفته به علت بزرگ بودن مجرای خروجی، بزرگتر از گردابه‌های انژکتور انتها-همگرا می‌باشد. تفاوت اصلی گردابه‌های این دو انژکتور قدرت گردابه‌ها می‌باشد، گردابه‌های شکل گرفته در انژکتور انتها-باز به علت پایین بودن سرعت‌های شعاعی و چرخشی، از قدرت کمتری برخوردار هستند به همین دلیل سریعاً حالت گردابه‌های خود را از دست داده و به سمت خروجی حرکت می‌کنند.

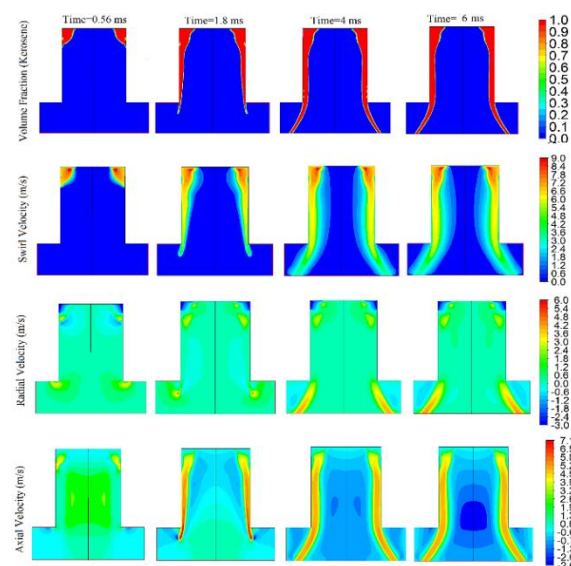
۳-۱-۳. مقایسه رفتار گذرای جریان کروسین در هر دو انژکتور

برای تحلیل و مقایسه بهتر این دو انژکتور و درک بهتر از تفاوت‌ها، نتایج در مراحل مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرند:

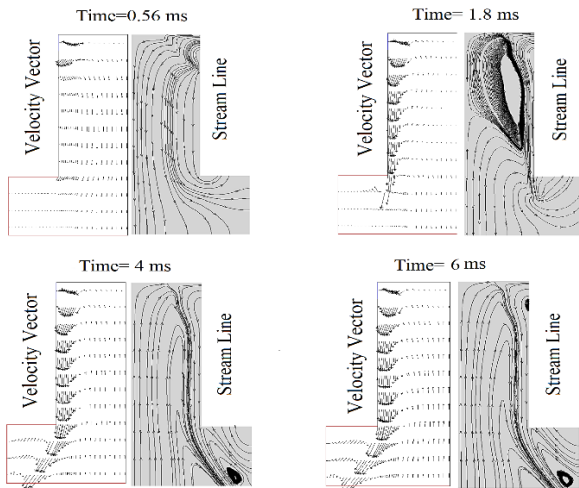
الف- کسر حجمی کروسین

تغییرات کسر حجمی کروسین با گذشت زمان نشان می‌دهد که کروسین در انژکتور انتها-باز در زمان ۱/۸ میلی‌ثانیه و در انژکتور انتها-همگرا در زمان ۴ میلی‌ثانیه خارج می‌شود. این

اوریفیس خروجی انژکتور حرکت می‌کند. در انژکتور پپچشی مماسی انتها-باز نیز همانند انژکتور انتها-همگرا قطر هسته هوا در نزدیکی اوریفیس خروجی افزایش و ضخامت لایه فیلم کروسین کاهش پیدا می‌کند، اما میزان کاهش در ضخامت لایه فیلم کروسین در ابتدا و انتهای انژکتور زیاد نیست که این نتایج در کار انجام شده توسط رازقی و همکاران [۱۳] نیز مشاهده شده است. علت این امر عدم تغییرات زیاد در سرعت شعاعی است. سرعت شعاعی بیشتر تابع تغییرات قطر می‌باشد به عبارت دیگر چون در طول انژکتور قطر محفظه انژکتور تغییر نمی‌کند، تغییرات زیادی در این روند حرکتی کروسین نیز ایجاد نخواهد شد. تغییرات کانتورهای سرعت مماسی و سرعت محوری نشان می‌دهد؛ در راستای محور انژکتور به سمت خروجی، سرعت مماسی کاهش و سرعت محوری افزایش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر سرعت مماسی به سرعت محوری تبدیل می‌شود. کانتور سرعت شعاعی در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد، به محض خروج کروسین از انژکتور به دلیل تغییر ناگهانی در هندسه و به تعبیر بهتر افزایش آزادی حرکت سیال در جهت شعاعی، سرعت شعاعی افزایش می‌کند و موجب حرکت کروسین در راستای شعاعی می‌شود. در مورد کانتور سرعت محوری همانند انژکتور انتها-همگرا به علت وابستگی دبی به سرعت محوری، با کاهش ضخامت لایه فیلم در اوریفیس سرعت محوری نیز افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۷. کانتورهای کسر حجمی، سرعت چرخشی، شعاعی و محوری در زمان‌های ۰/۵۶، ۱/۸، ۴ و ۶ ms.



شکل ۸. بردارهای سرعت و خطوط جریان سیال در زمان‌های ۰/۵۶ ms، ۱/۸، ۴ و ۶.

۳-۱-۴. مقایسه عوامل عملکردی

از جمله مهم‌ترین عوامل عملکردی مورد بررسی در انژکتورهای فشاری پیچشی می‌توان به مواردی از قبیل ۱- ضریب تخلیه ۲- دبی جرمی ۳- ضریب پر شوندگی سطح ۴- زاویه پاشش ۵- طول شکست ۶- اندازه قطرات ۷- نسبت سرعت مماسی به محوری و ۸- ضخامت لایه فیلمی در اوریفیس اشاره کرد. با توجه به اینکه در این مقاله هدف اصلی بررسی رفتار جریان داخلی انژکتور است به مواردی مثل طول شکست، اندازه قطرات و محاسبه دقیق زاویه پاشش نمی‌توان با مدل VOF به نتیجه مطلوبی رسید. بنابراین عوامل باقی مانده در ادامه برای این دو انژکتور در فشار عملیاتی یکسان ۱ MPa مقایسه خواهد شد. در جدول ۲ عوامل عملکردی ارائه شده است.

جدول ۲. مقایسه عوامل عملکردی انژکتور انتها-باز و همگرا در فشار

۱ MPa

مشخصه	انژکتور پیچشی مماسی انتها-باز	انژکتور پیچشی مماسی انتها-همگرا
ضخامت لایه فیلم کروسین (mm)	۰/۵	۰/۳۵
ضریب پر شوندگی سطح اوریفیس	۰/۲۶۵	۰/۵۷۷
ضریب تخلیه	۰/۰۳۱	۰/۳۷۴
دبی جرمی (kg/s)	۰/۰۴۷	۰/۰۴۷۳
زاویه پاشش (deg)	۳۶/۵	۳۱
ut/ua*1	۱/۰۸	۰/۷۸

* 1 = نسبت سرعت مماسی به محوری در اوریفیس انژکتور.

موضوع نشان می‌دهد زمان ماند کروسین در انژکتور انتها-باز به مراتب کمتر از انژکتور انتها-همگرا می‌باشد. با توجه به اینکه کروسین به صورت چرخشی در محفظه حرکت می‌کند به سمت خروجی نزدیک می‌شود، لذا وجود ناحیه همگرا موجب ماندگی بیشتر در انژکتور می‌شود.

ب- سرعت محوری

با نگاهی بر کانتورهای سرعت محوری هر دو انژکتور، می‌توان نتیجه گرفت که ماکزیمم مقدار سرعت محوری در هر دو انژکتور، در بخش خروجی انژکتور است، با این تفاوت که مقدار سرعت محوری در انژکتور انتها-همگرا در ناحیه خروجی به مراتب بیشتر از انتها-باز است، علت این تفاوت در سرعت محوری تغییر در قطر اوریفیس انژکتور است.

ج- سرعت مماسی و سرعت شعاعی

مهم‌ترین و واضح‌ترین مسئله‌ای که می‌توان در کانتورهای سرعت مماسی در دو انژکتور مشاهده کرد، دامنه نوسان سرعت مماسی و شعاعی است. دامنه نوسان سرعت مماسی و شعاعی در انژکتور انتها-همگرا به ترتیب $0 \rightarrow 28 \text{ m/s}$ و $0 \rightarrow 18 \text{ m/s}$ در انژکتور انتها-باز $0 \rightarrow 9 \text{ m/s}$ و $0 \rightarrow 5 \text{ m/s}$ است. این تفاوت در دامنه نوسان تاثیر خود را در کانتور فشار نشان می‌دهد و موجب ایجاد ناحیه پرفشار در نزدیکی دیواره محفظه انژکتور شده است. از دیگر تفاوت‌های این دو انژکتور این است که وجود بخش همگرا در انژکتور موجب شده که سرعت مماسی در انژکتور انتها-همگرا به سرعت شعاعی تبدیل شود در حالی در انژکتور انتها-باز سرعت مماسی به سرعت محوری تبدیل شده است. همچنین ماکزیمم مقدار سرعت شعاعی برای هر دو انژکتور در خروجی انژکتور رخ داده است [۱۹].

د- خطوط جریان و جهت بردار سرعت

بررسی تصاویر خطوط جریان نشان می‌دهد، گردابه‌های شکل گرفته در انژکتور انتها-باز ابتدا در نزدیکی محور انژکتور است. از نظر اندازه، گردابه شکل گرفته در انژکتور انتها-باز به مراتب بزرگتر از انتها-همگرا می‌باشد. نحوه حرکت گردابه‌ها در انژکتور انتها-باز با گذشت زمان موجب کشیده شدن کروسین به سمت دیواره می‌شود. همچنین با نگاهی دقیق‌تر به اندازه جهت بردار سرعت نیز می‌توان به این نتیجه رسید که اندازه بردار سرعت در انژکتور انتها-همگرا به مراتب بزرگتر از انژکتور انتها-باز است.

طول هسته هوای تشکیل شده در داخل انژکتور، ضخامت لایه فیلمی کروسین، نسبت سرعت مماسی به محوری در اوریفیس انژکتور، ضریب پرشوندگی سطح، ضریب تخلیه و زاویه پاشش مورد ارزیابی و تحلیل قرار خواهند گرفت. مقادیر این پارامترها در جدول ۳ برای هر دو انژکتور ارائه شده است.

مقدار ضخامت لایه فیلمی کروسین و ضریب پرشوندگی در فشار ۰/۰۱ MPa برای هر دو انژکتور نشان دهنده این است که سطح اوریفیس به صورت کامل، از کروسین پر شده است. اما ضریب تخلیه هر دو انژکتور نشان می‌دهد، با اینکه سطح اوریفیس هر دو انژکتور کاملا پر شده است اما با دبی ایده‌آل انژکتور فاصله دارد. در توضیح این رخداد باید گفت که دبی خروجی از انژکتور تابع سرعت محوری در اوریفیس است و سرعت مماسی و شعاعی تأثیری بر دبی خروجی از انژکتور ندارند. با توجه به معادله (۸) که نشان دهنده سرعت ایده‌آل است، اگر در حالت سطح پر شده از کروسین، سرعت محوری در اوریفیس انژکتور برابر سرعت حالت ایده‌آل باشد، می‌توان گفت دبی عبوری با دبی ایده‌آل برابر است [۴].

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (۸)$$

برای مثال در فشار ۰/۰۱ MPa، سرعت ایده‌آل برابر ۵ m/s است در حالیکه در انژکتور انتها-همگرا مقدار سرعت محوری در حدود ۲/۵ m/s می‌باشد. در فشار عملیاتی ۰/۰۱ MPa هسته هوایی در انژکتورها تشکیل نشده است و این امر نشان دهنده این است که سرعت مماسی به اندازه‌ای نیست که بتواند با ایجاد گردابه و ناحیه فشار منفی، باعث تشکیل هسته هوا شود. با این حال در فشار ۰/۰۱ MPa در انژکتور انتها-همگرا کروسین به صورت مخروط مانند اسپری شده است، اما هسته هوایی در داخل انژکتور ایجاد نشده است. علت تفاوت در شکل خروجی کروسین از این دو انژکتور در این فشار عملیاتی مقدار سرعت مماسی در خروجی اوریفیس انژکتور است. مقدار سرعت مماسی در انژکتور انتها-همگرا به مراتب بیشتر از انژکتور انتها-باز است.

در فشار ۰/۰۵ MPa ضخامت لایه فیلمی کروسین در هر دو انژکتور، کاهش شدیدی از خود نشان داده است. با توجه به طول هسته هوای تشکیل شده می‌توان نتیجه گرفت در هر دو انژکتور، هسته هوا شکل گرفته است. اما طول هسته هوای تشکیل شده در انژکتور انتها-باز به صورت کامل و تا سر انژکتور پیش رفته است. با نگاهی دقیق به مقادیر نسبت سرعت مماسی به محوری

با توجه به جدول ۲ بیشترین تفاوت در عواملی مثل ضریب پرشوندگی و ضریب تخلیه دیده می‌شود. در توجیه این اختلاف لازم است به دبی جرمی خروجی کروسین اشاره کرد در این دو انژکتور تفاوت چندانی مشاهده نمی‌شود و این مسئله نشان می‌دهد، تغییر در قطر اوریفیس (از ۷ میلی‌متر در انژکتور انتها-باز به ۲ میلی‌متر در انژکتور انتها-همگرا) باعث کاهش سطح مقطع عبوری شده است. با توجه معادله محاسبه دبی جرمی در حالت ایده‌آل (معادله ۶) این تغییر در قطر اوریفیس در اختلاف فشار یکسان، باعث افزایش ۱۲ برابری دبی حالت ایده‌آل می‌شود، در حالی که دبی جرمی عبوری از این دو انژکتور تفاوت چندانی ندارد. لذا تفاوت در ضریب تخلیه و ضریب پرشوندگی قابل توجیه است [۲۰].

$$\dot{m} = A\sqrt{2\rho\Delta p} \quad (۶)$$

یکی دیگر از تفاوت‌های مهم قابل مشاهده در جدول ۲ زاویه پاشش است. زاویه پاشش در انژکتورهای پیچشی مماسی با نسبت سرعت مماسی به سرعت محوری ارتباط مستقیم دارد. یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های انژکتور پیچشی مماسی ثابت مشخصه هندسی (A) انژکتور است. ثابت مشخصه هندسی به صورت معادله (۷) بیان می‌شود [۲۱].

$$A = \frac{(d_s - d_p) \times d_n}{nd_p} = \frac{\text{سرعت مماسی}}{\text{سرعت محوری}} \times \frac{(d_s - d_p)}{d_n} \quad (۷)$$

در معادله (۷)، (d_s) قطر محفظه انژکتور، (d_p) قطر روزنه ورودی، (n) تعداد روزنه ورودی و (d_n) قطر اوریفیس انژکتور است. در حالت کلی نسبت سرعت مماسی و به سرعت محوری در زاویه پاشش نقش اساسی دارد. مشخص است که با افزایش (A) زاویه پاشش نیز افزایش می‌یابد [۱۶، ۲۱].

۲-۳. تحلیل جریان پایا

به منظور بررسی پارامترهای عملکردی هر دو انژکتور در فشارهای تزریق مختلف در این بخش شبیه‌سازی پایا انجام شده است که نتایج به دست آمده در ادامه ارائه می‌شود.

۱-۲-۳. بررسی عوامل عملکردی در فشارهای عملیاتی مختلف

در این بخش به بررسی و ارزیابی عملکرد انژکتور پیچشی مماسی انتها-باز و انتها-همگرا در شرایط عملیاتی مختلف پرداخته می‌شود. بدین منظور شبیه‌سازی‌های انجام شده بر اساس جریان پایا در فشارهای تزریق متفاوت است و عوامل عملکردی همچون:

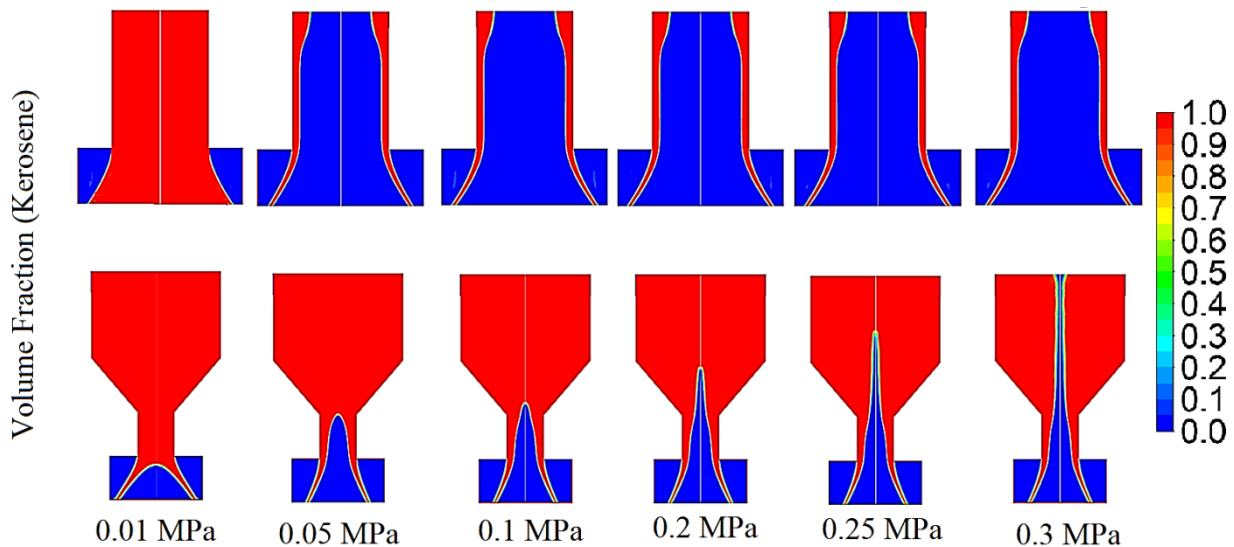
با افزایش فشار از 0.1 MPa به 0.5 MPa مشخص می‌شود که نه تنها شیب افزایش این نسبت در انژکتور انتها-باز به مراتب بیشتر از انتها-همگرا می‌باشد بلکه این نسبت برای انژکتور انتها-همگرا کاهش یافته است. به همین دلیل تغییرات مشاهده شده در نتایج انژکتور انتها-باز مخصوصاً در مورد شکل‌گیری هسته هوا بیشتر است. همچنین با توجه به مطالب بخش تحلیل جریان گذرای انژکتور انتها-باز، گردابه‌های شکل گرفته در این انژکتور بزرگتر و از قدرت بیشتری برخوردار هستند.

با توجه به داده‌های جدول ۳ برای هر دو انژکتور با افزایش فشار از 0.5 MPa تا 0.3 MPa تغییر چندانی در عوامل ضریب تخلیه، ضریب پرشوندگی و ضخامت لایه فیلم کروسین مشاهده نمی‌شود. اما طول هسته هوای شکل گرفته در انژکتور انتها-همگرا و زاویه پاشش در انژکتور انتها-باز تغییر می‌کند. برای درک بهتر این موضوع شکل ۹ کسر حجمی کروسین را در فشارهای تزریق مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۳. مقایسه عوامل عملکردی دو انژکتور انتها-باز و انتها-همگرا در فشارهای تزریق مختلف.

طول هسته هوا	ut/ua*1	زاویه پاشش	ضریب پرشوندگی	ضریب تخلیه	دبی جرمی ایده‌آل	دبی جرمی	ضخامت لایه فیلم کروسین	مشخصه فشار تزریق (MPa)	
								O-E	C-E
mm	-	deg	-	-	kg/s	kg/s	mm		
تشکیل نشده است	-	-	۱	۰/۵۱	۰/۱۵۳	۰/۰۰۸	۳/۵	O-E*2	۰/۰۱
تشکیل نشده است	۱/۲۲	۴۰	۱	۰/۵۵	۰/۰۱۲۵	۰/۰۰۷	۱	C-E*3	
کامل	۱/۰۲۵	۳۵	۰/۲۶۵	۰/۰۳۷	۰/۳۴۴	۰/۰۱۲	۰/۵	O-E	۰/۰۵
۲	۰/۷۹۹	۲۸	۰/۶۴	۰/۴۶	۰/۰۲۸	۰/۰۱۳	۰/۴	C-E	
کامل	۱/۰۶	۳۵/۵	۰/۲۶۵	۰/۰۳۴	۰/۴۸۶	۰/۰۱۶	۰/۵	O-E	۰/۱
۲/۷	۰/۷۹۶	۲۸	۰/۶۲۷	۰/۴۲	۰/۰۳۹	۰/۰۱۷	۰/۳۹	C-E	
کامل	۱/۰۷	۳۶	۰/۲۶۵	۰/۰۳۳	۰/۶۸۸	۰/۰۲۳	۰/۵	O-E	۰/۲
۴/۲۵	۰/۷۷۹	۲۹	۰/۶۱۵	۰/۴۱	۰/۰۵۶	۰/۰۲۳	۰/۳۸	C-E	
کامل	۱/۰۷۶	۳۶	۰/۲۶۵	۰/۰۳۲	۰/۷۶۹	۰/۰۲۵	۰/۵	O-E	۰/۲۵
۶/۲	۰/۷۷۲	۲۹	۰/۶۰۹	۰/۴	۰/۰۶۲	۰/۰۲۵	۰/۳۷۵	C-E	
کامل	۱/۰۷۷	۳۶/۵	۰/۲۶۵	۰/۰۳۲	۰/۸۴۸	۰/۰۲۷	۰/۵	O-E	۰/۳
کامل	۰/۷۵	۳۰	۰/۵۹	۰/۴	۰/۰۶۸	۰/۰۲۸	۰/۳۶	C-E	

*1=نسبت سرعت مماسی به محوری *2=انژکتور انتها-باز (Open-End) *3=انژکتور انتها-همگرا (Con-End)



شکل ۹. کانتورهای کسر حجمی در فشارهای تزریق مختلف.

کروسين در فشار تزریق MPa ۱، برای انژکتور انتها-باز ۱/۸ ms و برای انژکتور انتها-همگرا ۴ ms است.

۴- دبی خروجی از هر دو انژکتور برای هر دو شبیه‌سازی اختلاف کمی با دبی تجربی دارد. اما مقادیر ضریب تخلیه نشان می‌دهد، دبی خروجی از انژکتور انتها-باز با دبی حالت ایده‌آل خود، فاصله زیادی دارد.

۵- از نقطه نظر پایداری در جریان سوخت کروسين و شکل‌گیری هسته هوا، انژکتور انتها-باز در محدوده فشار تزریق MPa ۰/۰۵ و انژکتور انتها-همگرا در محدوده فشار تزریق MPa ۰/۳ به حالت پایدار و کامل شدن هسته هوا می‌رسند.

۶- نتایج شبیه‌سازی در فشارهای تزریق مختلف نشان داد بعد از عبور از حالت پایدار، افزایش فشار تزریق تاثیر چندانی بر روی عواملی مثل ضریب تخلیه، زاویه پاشش و ضریب پرشوندگی سطح اوریفیس ندارند.

۷- با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های ۲ بعدی، مقادیر سرعت‌های محوری، مماسی و شعاعی در انژکتور انتها-همگرا بیشتر از انژکتور انتها-باز می‌باشد. با توجه به ارتباط مقادیر سرعت با نیروی ایرودینامیکی اعمال شده روی لایه سیال و کاهش طول شکست، عملکرد انژکتور انتها-همگرا در شرایط عملیاتی استاندارد طراحی محفظه‌های احتراق، به مراتب بهتر از انژکتور انتها-باز می‌باشد.

همانطور که از شکل ۹ مشخص است با افزایش فشار تزریق روند شکل‌گیری هسته هوا توسعه یافته و کامل می‌شود. علت افزایش طول هسته هوا در انژکتور انتها-همگرا و زاویه پاشش در انژکتور انتها-باز ارتباط مستقیم با نسبت سرعت مماسی به محوری دارد. داده‌های جدول ۳ نشان می‌دهد هر چه فشار عملیاتی افزایش پیدا کرده است، نسبت این سرعت در هر دو انژکتور افزایش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش فشار تزریق سرعت مماسی در داخل انژکتور بیشتر شده و گردابه‌ها شکل گرفته و موجب حرکت کروسين به سمت دیواره‌ها می‌شود.

۴. نتیجه گیری

خلاصه نتایج به دست آمده از تحقیق، به شرح زیر است:

- ۱- قطر هسته هوا در هر دو انژکتور انتها-باز و انتها-همگرا در خروجی از اوریفیس انژکتور به بیشترین مقدار خود می‌رسد.
- ۲- نحوه حرکت گردابه‌ها در داخل هر دو انژکتور، با گذشت زمان از نزدیکی محور انژکتور به سمت ورودی سوخت کروسين می‌باشد، با این تفاوت که گردابه داخلی در انژکتور انتها-همگرا بزرگتر از انتها-باز است. نحوه حرکت گردابه در بیرون هر دو انژکتور به سمت محور انژکتور است. در حالی که گردابه انژکتور انتها-باز به مراتب بزرگتر از انتها-همگرا می‌باشد.
- ۳- زمان ماند سوخت کروسين در انژکتور انتها-همگرا بیشتر است. نتایج شبیه‌سازی در حالت گذرا نشان داد مدت زمان خروج

۵. مأخذ

- [1] Arcoumanis, C., et al., Modeling of pressure-swirl atomizers for GDI engines. SAE transactions, p. 516-532, 1999.
- [2] Lefebvre, A.H. and V.G. McDonell, Atomization and sprays. CRC press, 2017.
- [3] Kang, Z., et al., Review on pressure swirl injector in liquid rocket engine. Acta Astronautica, 145: p. 174-198, 2018.
- [4] Ommi, F., Space Rocket Propulsion & Engine. Best publisher, 2010, (in Persian)
- [5] Taylor. The mechanics of swirl atomizer. In International congress Applied mechanics. 1948.
- [6] Doumas, M. and R. Laster, Liquid-film properties for centrifugal spray nozzles. Chemical Engineering Progress, Vol 49: p. 518-526, 1953.
- [7] Dumouchel, C., et al., Viscous flow in a swirl atomizer. Chemical Engineering Science, Vol. 48(1): p. 81-87, 1993.
- [8] Dash, S., et al., Formation of air core in nozzles with tangential entry. Journal of fluids engineering, Vol. 123(4): p. 829-835, 2001.
- [9] Mandal, A., et al., Flow of power-law fluids in simplex atomizers. International journal of heat and fluid flow, Vol. 29(5): p. 1494-1503, 2008.
- [10] Hosseinalipour, S.M., H. Karimaei, and F. Ommi, Design, Numerical Simulation and Experiment of a Swirl Injector with Tangential Inlets. fuel and combustion, 2014, (In Persian).
- [11] Rostami, E., et al., Investigation of The Effect Of Liquid And Air Swirl Velocity And Liquid Viscosity On The Hollow Cone Spray Atomization. Annals of the University of Petrosani Mechanical Engineering, P.16-28, 2014.
- [12] Fu, Q.-f., Numerical simulation of the internal flow of swirl atomizer under ambient pressure.

- Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 230(15): p. 2650-2659, 2016.
- [13] Razeghi, A., O.E. Nural, and Ö. Ertuğ, Experimental and Numerical Investigation of Circumferential Distribution of Open-End Swirl Atomizer, In 9th Ankara international aerospace conference, Metu, Ankara, 2018.
- [14] Laurila, E., et al., Computational and experimental investigation of a swirl nozzle for viscous fluids. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 128: p. 103278, 2020.
- [15] Sun, Y., et al., Numerical Simulation and Experimental Study on Flow Field in a Swirl Nozzle. Shock and Vibration, P. 1-9, 2021.
- [16] Yang, V., et al., Liquid rocket thrust chambers: aspects of modeling, analysis, and design. Progress in astronautics and aeronautics, 2004.
- [17] Kim, H., et al., Spray characteristics of aluminized-gel fuels sprayed using pressure-swirl atomizer. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 249: p. 36-47, 2017.
- [18] Amini, G., Liquid flow in asimplex nozzle. Internatioal Journal of Multiphase Flow, Vol. 79, P. 225-235, 2018.
- [19] Lee, S.Y. and R. Tankin, Study of liquid spray (water) in a non-condensable environment (air). International journal of heat and mass transfer, Vol. 27(3), p. 351-361, 1984.
- [20] Munson, B.R., et al., Fluid mechanics. Wiley Singapore, 2013.
- [21] Yang, L.-j., et al., Spray characteristics of gelled propellants in swirl injectors. Fuel, Vol. 97: p. 253-261, 2012.

پی نوشت

-
- 1 . Atomization
 - 2 . Spray
 - 3 . Simplex injector
 - 4 . Open-end
 - 5 . Converge-end
 - 6 . Breakup length
 - 7 . Discharge coefficient
 - 8 . Volume of Fluid (VOF)
 - 9 . Axisymmetric swirl
 - 10 . Unstructured
 - 11 . Power index
 - 12 . Geometry characteristics constant
 - 13 . Pseudo plastic
 - 14 . Dilatant
 - 15 . k-epsilon
 - 16 . Primary breakup
 - 17 . Mie and LIF scattering
 - 18 . Node
 - 19 . FLUENT
 - 20 . Pressure based
 - 21 . Segregate
 - 22 . PREssure STaggering Option
 - 23 . Turbulent kinetic energy
 - 24 . Dissipation rate
 - 25 . Second order up wind
 - 26 . First order up wind
 - 27 . Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations (SIMPLE)
 - 28 . Reynolds stress
 - 29 . Kerosene