

بررسی تجربی و عددی مشخصات عملکردی انژکتور فشاری-پیچشی

علی غلامی^۱، پوریا میکانیکی^{۲*}، سینا رجبلو^۳، مصطفی کشاورزبان^۴

۳- کارشناس ارشد هوافضا، دانشگاه مالک اشتر، sina.rajabloo@gmail.com و redlinee0111@gmail.com
۴- کارشناس ارشد هوافضا، دانشگاه علم و صنعت ایران، pouria.mikaniki70@gmail.com و mokenjine@yahoo.com

*نویسنده مخاطب

چکیده

در این پژوهش مشخصات عملکردی انژکتور فشاری-پیچشی به صورت تجربی و عددی بررسی شده است. نتایج زاویه‌ی پاشش تجربی با عددی مقایسه شده است و تطابق هفت درصد داشته است. مشخصات عملکردی تجربی که مورد بررسی قرار گرفته است؛ شامل دبی، زاویه و الگوی پاشش می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش فشار، زاویه پاشش افزایش می‌یابد و با توسعه رژیم جریان به حالت توسعه یافته زاویه‌ی پاشش تقریباً ثابت باقی می‌ماند. نتایج ضریب تخلیه نشان می‌دهد ابتدا افزایش یافته و بعد از توسعه‌ی کامل جریان، ثابت باقی می‌ماند. توزیع پاشش توسط دستگاه نمونه‌گیری ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد الگوی پاشش متقارن بوده و ایجاد مخروط تو خالی پاشش را تایید می‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد با افزایش فشار، الگوی پاشش گسترده‌تر می‌شود.

واژه های کلیدی: انژکتور فشاری-پیچشی-ضریب تخلیه- زاویه پاشش- الگوی پاشش

۱- مقدمه

انژکتورهای فشاری-پیچشی به دلیل ساختار ساده و قدرت پودر سازی بالای سوخت، به صورت گسترده در صنایع مختلف مانند موتورهای سوخت مایع، موتورهای هوایی و زمینی مورد استفاده می‌شود. کلیه مشخصات عملکردی که در انژکتورها مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد شامل؛ دبی، ضریب تخلیه، زاویه‌ی پاشش، طول شکست، توزیع فضایی پاشش و میانگین قطر قطرات می‌باشد. مقایسه‌ی مشخصات عملکردی منعکس‌کننده‌ی کیفیت پاشش انژکتور می‌باشد. هرچه قطر قطرات تولیدی انژکتور کمتر باشد، نرخ تبخیر افزایش یافته و راندمان افزایش یافته و تولید آلاینده‌های حاصل از احتراق کمتر می‌شود [۱] و [۲]. ضخامت فیلم سیال که باعث تولید اسپری می‌شود، بر روی زاویه پاشش بسیار تاثیرگذار است که این پارامتر به هندسه‌ی خروجی انژکتور بستگی دارد. از پژوهشگرانی که در این زمینه مطالعات انجام داده‌اند در این بخش ارائه می‌شود.

ژانگ‌هی کیانگ و همکاران [۳] اثر تغییر قطر و طول محفظه چرخش انژکتور پیچشی هم‌محور را در یک محیط با دمای بالا، به صورت عددی مورد بررسی قرار داده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که در تورفتگی مخروطی شکل انژکتور هم‌محور به دلیل گرادین سرعت بسیار زیاد بین گاز و جریان سوخت مایع، قطرات از لایه مایع جدا می‌شوند و محترق می‌شوند و در نتیجه در داخل انژکتور به دلیل دمای بالا، یک ناحیه احتراقی پدیدار می‌شود. گولدولسی [۴] تبخیر و احتراق سوخت‌های موتورهای دیزلی در فشارهای بالا را مدل‌سازی کردند. در تحقیق آنها دو مدل کیفیت سوخت، یکی Rich و دیگری Lean بررسی شده و پارامترهایی از جمله تأخیر در اشتعال، سرعت و توزیع فضایی اسپری مورد مطالعه و آزمایش قرار گرفتند. از نتایج کار، تأثیر مستقیم کیفیت سوخت بر پارامترهایی همچون تأخیر در اشتعال و انرژی

فعال‌سازی در درجه حرارت بالا مشاهده شد. گولدولسی و همکارش [۵] در پژوهش عددی فرآیند احتراق را برای دو نوع سوخت مختلف مورد بررسی قرار دادند. پارامترهایی شامل زاویه پاشش، میزان نفوذ، تأخیر در اشتعال، مساحت شعله و دمای شعله در یک محفظه حجم ثابت با یک گرم‌کن الکتریکی به دست آورده شدند. از جمله نتایج این پژوهش، عمر و نفوذ قطره برای سوخت سنگین از دیزل بیشتر بوده است. تأخیر در اشتعال دیزل از سوخت سنگین کمتر است و همچنین به این نتیجه رسیدن که دمای اولیه زیاد، باعث کاهش در تأخیر اشتعال می‌شود. سام و آگاروال [۶] مشخصه‌های عملکردی انژکتور را به صورت تجربی و مدل‌سازی بررسی کردند. برای مدل‌سازی فروپاشی از روش (K - H) استفاده کردند. نتایج نشان داد که افزایش ناپایداری‌های جریان منجر به ایجاد قطرات با اندازه کوچک‌تر، کاهش طول نفوذ و افزایش پراکندگی شعاعی می‌شود. چانگ و همکاران [۷] جریان داخل انژکتور فشاری-پیچشی را از روش حجم کنترل و فرض جریان دوفازی با استفاده از روش (k - ε) مدل کردند. آن‌ها مشخصه‌های عملکردی انژکتور را به دست آوردند. اشمیت و همکاران [۸] مدل فروپاشی اولیه انژکتور فشاری-پیچشی به نام لیسارائه کردند. روش لیسارائه بر مبنای رشد امواج ناپایدار روی سطح ورق مایع است. خروجی‌های این مدل به سه قسمت ضخامت فیلم مایع، طول شکست صفحه سیال و قطر قطرات تقسیم می‌شود.

کیراکیدس و همکاران [۹] محفظه احتراقی با حجم ثابت در فشار بالا را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها شبیه‌سازی را با استفاده از مدل (E-TABE) و با دو هندسه مختلف انژکتور و با استفاده از دو نوع سوخت انجام دادند. آن‌ها به این نتایج رسیدن که، اسپری سوخت سنگین در مقایسه با دیزل دارای طول نفوذ بیشتر و قطر قطرات بزرگ‌تری خواهد بود. در این پژوهش مشخصات عملکردی انژکتور فشاری-پیچشی شامل دبی، ضریب تخلیه، زاویه‌ی پاشش و الگوی پاشش به صورت تجربی بررسی شده است. شبیه‌سازی عددی نیز با هندسه‌ی انژکتور طراحی و ساخته شده انجام شده است و زاویه‌ی پاشش با نتایج تجربی مقایسه شده است.

۲- روش آزمون تجربی

۲-۱- اندازه‌گیری دبی

شماتیک میز آزمون در شکل ۱ نشان داده شده است. برای انجام آزمون از سوخت کالیبراسیون MIL-C-7024 نوع II استفاده شده است. آزمون در چهار فشار ۰٫۵ Mpa، ۱ Mpa، ۱٫۷ Mpa، و ۲ Mpa بوده و همچنین آزمون‌ها در دمای ۲۰ درجه سلسیوس انجام شده است. برای انجام آزمون ابتدا مخزن از سوخت پر شده و از فیلتر ۵۰ میکرونی عبور می‌کند. فشار توسط پمپ دنده‌ای افزایش یافته و با شیر سوزنی فشار خروجی از انژکتور تنظیم شده و در داخل مخزن جمع‌آوری می‌شود و توسط پمپ گریز از مرکز به مخزن ذخیره بازگردانده می‌شود. بعد از باز کردن شیر تویی و گذشت زمان ۲۰ ثانیه برای پایدار شدن جریان، دبی اندازه‌گیری می‌شود. سپس

۱-۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر این شبیه سازی، شامل معادلات ناویر استوکس می باشد. در زیر، معادلات ناویر استوکس که شامل معادلات مومنتوم، پایداری انرژی و معادله انتقال گونه ها می باشد آورده شده است.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(pU_i)}{\partial x_j} = S_m \quad (1)$$

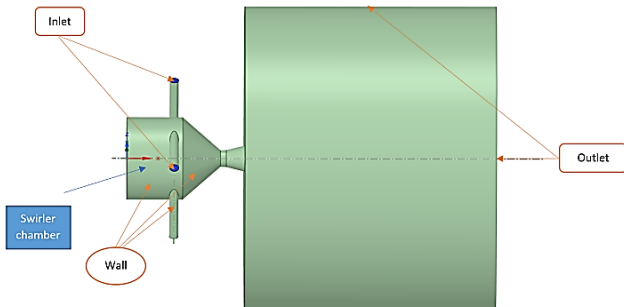
$$\frac{\partial(U_i)}{\partial t} + \sum_j U_j \frac{\partial(U_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \sum_j \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\tau_{ji})}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(pC_p T)}{\partial t} + U_j \frac{\partial(pC_p T)}{\partial x_j} = K \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} - p \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \tau_{Kij} \frac{\partial U_k}{\partial x_j} + St \quad (3)$$

$$\frac{\partial(C_n)}{\partial t} + U_j \frac{\partial(C_n)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(Dn \frac{\partial \tau_n}{\partial x_j} \right) + S_n \quad (4)$$

در معادلات بالا S_m , S_p , S_n , St , S_n معرف منبع می باشند. K ضریب انتقال حرارتی است.

در این شبیه سازی جهت اعتبارسنجی از ابعاد انژکتور ساخته شده استفاده شده است. همچنین از شبکه بی سازمان جهت شبیه سازی استفاده شده است. در شکل زیر درگاه های ورودی سیال به و شرایط مرزی مورد استفاده در آن نشان داده شده است. سیال از طریق ۴ درگاه ورودی، به صورت مماسی به درون محفظه چرخش انژکتور وارد می شود. در شکل ۳ دامنه حل و شرایط مرزی نشان داده شده است.



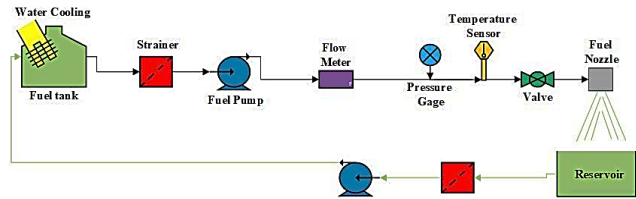
شکل ۳ شرایط مرزی اعمال شده در نرم افزار

شرایط مرزی که بر روی انژکتور مورد استفاده قرار گرفته است در جدول ۲ نشان داده شده است. برای درگاه های ورودی سیال، شرط مرزی mass flow inlet اتخاذ شده است. همچنین تمامی دیوارهای دامنه حل مربوط به انژکتور به عنوان wall در نظر گرفته شده است که ضریب اصطکاک جهت شبیه سازی بهتر در آن اتخاذ شده است. در ادامه، دامنه خروجی به صورت pressure outlet در نظر گرفته شده است.

جدول ۲ شرایط مرزی دامنه حل

Inlet	Mass flow inlet
wall	Specified shear
outlet	Pressure outlet

انژکتور روی استند دیگری نصب شده و برای عکس برداری اسپری در فشارهای مختلف استفاده می شوند.



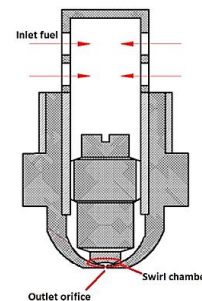
شکل ۱ شماتیک میز آزمون

طراحی انژکتور فشاری- پیچشی براساس مرجع [۱۲] انجام شده است. ورودی های طراحی انژکتور شامل دبی (\dot{m})، زاویه پاشش (θ)، اختلاف فشار (Δp)، چگالی (ρ) و ویسکوزیته سینماتیکی (ϑ) می باشد. ابعاد انژکتورهای ساخته شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

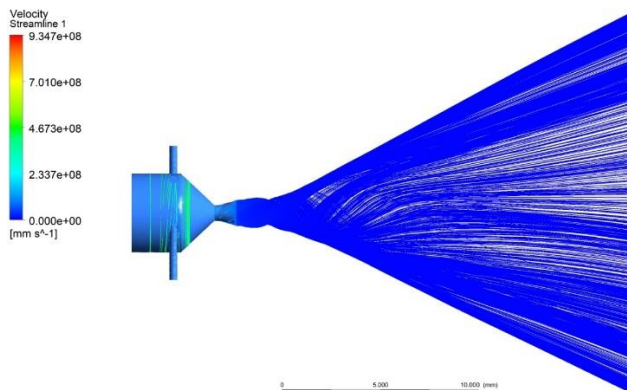
جدول ۱ مشخصات هندسی انژکتورهای ساخته شده

مشخصات	واحد	انژکتور
قطر خروجی انژکتور (d_o)	(mm)	۰٫۸
طول سوراخ (l_o)	(-)	۱٫۱
نسبت طول به قطر (l_o/d_o)	(-)	۱٫۴

d_o قطر سوراخ خروجی و l_o طول سوراخ خروجی می باشد که در شکل ۲ شماتیک انژکتور نشان داده شده است. قسمت های مختلف انژکتور شامل قسمت ورودی، سوراخ خروجی، محفظه چرخش می باشد. عملکرد انژکتورهای فشاری- پیچشی بدین گونه است که ابتدا از قسمت ورودی سیال وارد انژکتور شده و سپس وارد قسمت شتاب دهنده (به دلیل کم شدن مساحت) می شود تا سرعت گیرد. بعد از شتاب گیری، سیال وارد شیارهای مماسی می شود که باعث چرخش سیال می شود که این چرخش در محفظه چرخش نیز ادامه پیدا می کند. چرخش سیال درون محفظه چرخش باعث ایجاد فشار نسبی خلا داخل محفظه انژکتور می شود که در نتیجه باعث کشیده شدن هوا و تشکیل ستون هوایی در مرکز محفظه می شود. در نتیجه جریان خروجی به صورت مخروطی تو خالی از انژکتور خارج می شود.

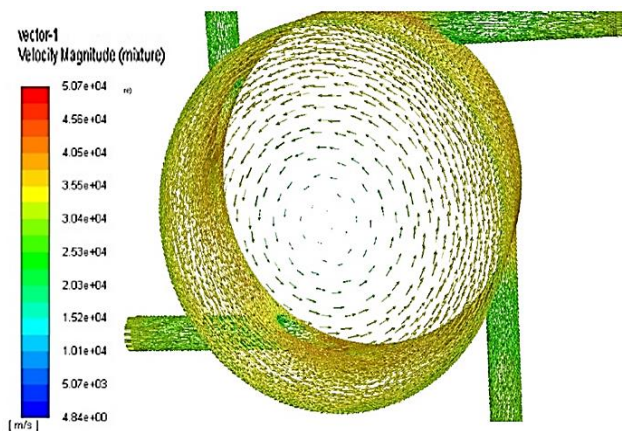


شکل ۲ شماتیک انژکتور مورد آزمون



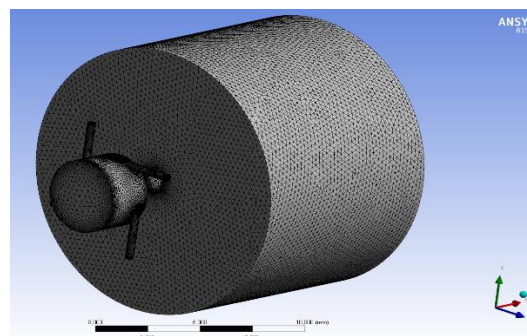
شکل ۵ خطوط سرعت مربوط به جریان خروجی در فشار $\Delta P = 1.7 \text{ Mpa}$

اساس کار انژکتورهای فشاری-پیچشی، مبتنی بر چرخش سیال درون انژکتور و ایجاد نیروی گریز از مرکز است. در این شبیه‌سازی عددی، با استفاده از چهار درگاه ورودی، سیال به درون محفظه چرخش انژکتور وارد می‌شود. در این حالت، با چرخش جریان در قسمت محفظه چرخش، سیال با سرعت و فشار بالا به چرخش در می‌آید و ضمن ایجاد یک هسته هوا در وسط انژکتور، به حالت چرخشی از خروجی انژکتور خارج می‌شود که این امر سبب ایجاد فرآیند اسپری می‌شود. در شکل زیر نحوه چرخش جریان در انژکتور با استفاده از بردارهای سرعت نشان داده شده است. جهت استقلال از شبکه محاسباتی، زاویه پاشش در تعداد شبکه متفاوت بدست آورده شده و با مقدار زاویه پاشش در آزمایش تجربی مقایسه شده است. در ابتدا با استفاده از ۲۱۴۵۸۷ شبکه، زاویه پاشش تعیین شده و سپس با استفاده از ۵۶۳۲۱۲ شبکه و ۱۲۳۲۵۸۹ شبکه، شبیه‌سازی انجام شده است که در جدول ۳ ابتدا بین نتایج بدست آمده از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی در چند فشار مختلف برای سیال ورودی، زاویه پاشش بدست آمده مقایسه گردیده است. این کار جهت اطمینان بیشتر به نتیجه شبیه‌سازی است. در ادامه جهت استقلال از شبکه محاسباتی مقایسه زاویه پاشش بدست آمده در تعداد شبکه مختلف، آورده شده است.



شکل ۶ بردارهای سرعت در محفظه چرخش انژکتور در فشار $\Delta P = 1.7 \text{ Mpa}$

در این شبیه‌سازی از شبکه بی‌سازمان، جهت شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. در نواحی نزدیک به دیواره‌ها، و درگاه ورودی و محفظه چرخش و اوریفیس، از شبکه‌بندی لایه‌مرزی نیز استفاده شده است. دلیل این امر شبیه‌سازی بهتر جریان در نزدیک به دیواره‌ها و لایه‌مرزی است. در شکل ۴ دامنه حل همراه با شبکه بندی بی‌سازمان را مشاهده می‌کنیم. تعداد شبکه‌های نامنظم در این شبیه‌سازی ۵۶۳۲۱۲ است.



شکل ۴ شبکه‌بندی دامنه حل

با استفاده از نتایج دبی بدست آمده همچنین از حل سه فازی در این قسمت استفاده شده است. در این پژوهش ابتدا زاویه پاشش بدست آمده از آزمایش تجربی با مدل بدست آمده در شبیه‌سازی عددی مقایسه شده است سپس استقلال از شبکه محاسباتی برای تعداد شبکه مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و پس از آن برای جریان سیال ورودی، میزان زاویه پاشش، توزیع فشار در انژکتور و اندازه‌ی قطر قطرات و نحوه‌ی انتشار آن، همچنین کانتور سرعت در بدست آمده است.

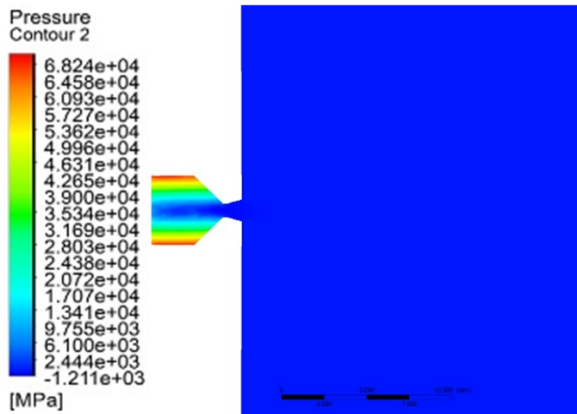
لازم به ذکر است که دبی ورودی به انژکتور تحت شرایط آزمایش در فشارهای مختلف و به صورت تجربی اندازه‌گیری شده است. در پژوهش از مدل ($K-\epsilon$ Realizable, standard wall function) استفاده شده است. همچنین از مدل species transport جهت انتقال گونه‌ها استفاده شده است. در این شبیه‌سازی از مدل mixture جهت ایجاد جریان چندفازی استفاده شده که در آن هوا به عنوان سیال اولیه و سوخت به عنوان سیال ثانویه در نظر گرفته شده است. همچنین از فاز بخار سوخت نیز جهت شبیه‌سازی قطرات استفاده شده است. از مدل فاز گسسته و مدل pressure swirl atomizer جهت شبیه‌سازی جریان خروجی از انژکتور به‌کارگیری است.

۴- نتایج

در این بخش به بررسی کانتورهای فشار، سرعت، پراکندگی قطرات و قطر قطرات بدست آمده از شبیه‌سازی پرداخته می‌شود. در ابتدا زاویه جریان خروجی از انژکتور بدست آمده در شبیه‌سازی در فشار ۱۷۰۰ کیلوپاسکال را با زاویه بدست آمده از شرایط آزمایشگاهی مقایسه می‌شود و سپس بعد از اعتبارسنجی، به بررسی کانتورها و قطر قطرات در شرایط مختلف پرداخته می‌شود. در شکل ۵ خطوط سرعت مربوط به جریان سیال خروجی از نازل مشاهده می‌شود.

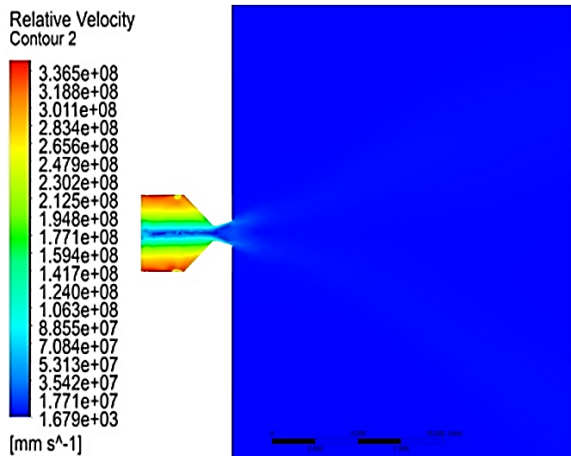
مختلف، و صرف هزینه محاسباتی کمتر، از تعداد شبکه ۵۶۳۲۱۲ استفاده شده است.

با افزایش فشار سیال در ورودی، میزان فشار نسبی در مرکز محفظه چرخش انژکتور کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فشار سیال ورودی، مقدار بیشینه فشار نیز افزایش می‌یابد. مقدار بیشینه فشار، نزدیک به دیواره‌ها و در محل چرخش جریان است که در شکل کانتورهای فشار قابل مشاهده است.



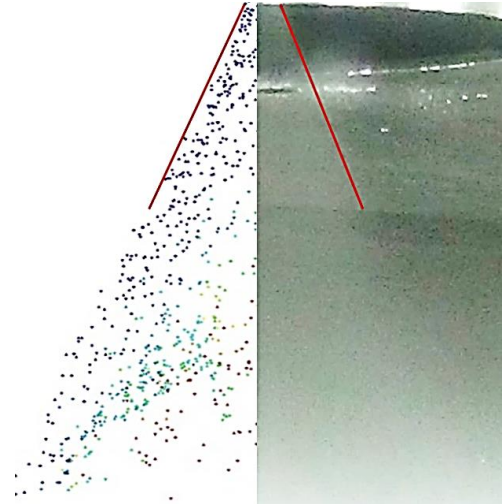
شکل ۸ کانتور فشار نسبی در فشار $\Delta P = 1.7 \text{ Mpa}$

تغییرات سرعت در انژکتور با استفاده از کانتورهای سرعت نسبی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل کانتور سرعت نسبی برای $\Delta P = 1.7 \text{ Mpa}$ آورده شده است.



شکل ۹ کانتور در سرعت نسبی در فشار $\Delta P = 1.7 \text{ Mpa}$

با توجه به شکل، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش فشار سیال ورودی، میزان سرعت نسبی سیال در نزدیک دیواره محفظه چرخش، بیشتر از از نقاط دیگر است به طوری که در نزدیک دیواره، بیشترین سرعت سیال را مشاهده می‌شود که به تدریج هرچقدر به مرکز محفظه چرخش نزدیک‌تر می‌شود، میزان سرعت سیال کاهش یافته و در نهایت در مرکز محفظه چرخش، سرعت سیال به صفر می‌رسد که با توجه به تعریف هسته هوا، این موضوع قابل توجیح است. با افزایش فشار سیال، سرعت مماسی سیال افزایش یافته در نتیجه با افزایش سرعت مماسی، سرعت خروج سیال از انژکتور و ورود آن به محیط نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۷ مقایسه‌ی زاویه‌ی پاشش تجربی و شبیه‌سازی

در شکل بالا، زاویه پاشش بدست آمده از حل عددی و آزمایش تجربی در کنار یکدیگر نشان داده شده است. در سمت چپ شکل ۷، زاویه پاشش بر اساس انتشار قطرات حاصل از شبیه سازی محاسبه شده است. در جدول ۳، نتایج تجربی و عددی زاویه‌ی پاشش در فشار $\Delta P = 1.7 \text{ Mpa}$ نشان داده شده است که مطابقت آن مشاهده می‌شود.

جدول ۳ مقایسه نتایج زاویه‌ی پاشش تجربی و عددی

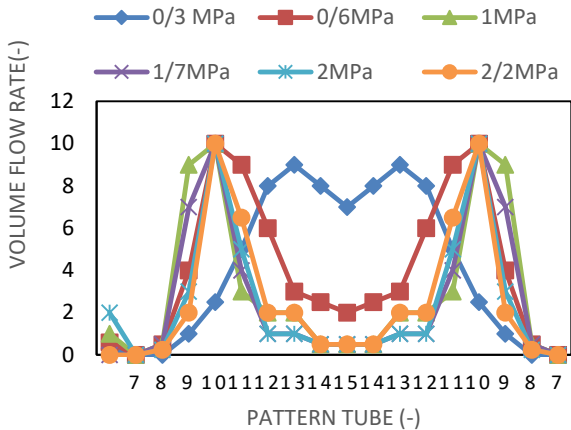
فشار سیال ورودی (Mpa)	۰.۵	۱	۱.۷	۲
زاویه پاشش (تجربی)	۵۹.۱	۶۸.۳	۶۸.۵	۶۸.۵
زاویه پاشش (عددی)	۶۳.۵	۷۲.۶	۷۲.۹	۷۲.۹

با توجه به جدول بالا، مشاهده می‌شود که در هر فشار، میزان اختلاف نتایج حاصل از شبیه سازی عددی، اختلاف کمی با مقدار آن، در آزمایش تجربی دارد که این موضوع نشان از قابل اطمینان بودن روش عددی جهت انجام شبیه سازی است. در جدول ۴ مقدار زاویه پاشش بدست آمده در در تعداد شبکه مختلف جهت استقلال از شبکه محاسباتی است.

جدول ۴ مقایسه نتایج زاویه‌ی پاشش در تعداد شبکه مختلف

تعداد شبکه	۲۱۴۵۸۷	۵۶۳۲۱۲	۱۲۳۲۵۸۹
زاویه پاشش (عددی)	۶۸	۷۲.۹	۷۴

در جدول ۴، مقدار زاویه پاشش بدست آمده در تعداد شبکه مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش تعداد شبکه از ۲۱۴۵۸۷ به ۱۲۳۲۵۸۹، باعث اختلاف زیادی در نتیجه نشده است. در جدول شماره ۳، جهت بدست آوردن زوایای پاشش از شبیه سازی عددی، از تعداد شبکه ۵۶۳۲۱۲، استفاده شده است. لذا جهت استخراج نتایج



شکل ۹ دبی حجمی انژکتور در فشارهای مختلف بر حسب لوله‌های اندازه‌گیری

۵- نتیجه‌گیری

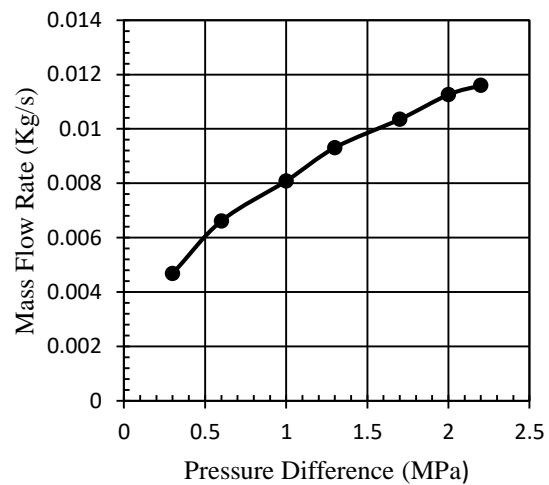
در این پژوهش مشخصات عملکردی انژکتور به صورت تجربی و عددی بررسی شده است. اختلاف نتایج زاویه‌ی پاشش عددی و تجربی حدود هفت درصد بدست آمده است. نتایج دبی، ضریب تخلیه و الگوی پاشش برای فشارهای مختلف گزارش شده است. با افزایش فشار دبی با شیب درجه دو افزایش می‌یابد. نتایج ضریب تخلیه نشان می‌دهد ابتدا ضریب تخلیه افزایش یافته و بعد از توسعه یافتن جریان، ضریب تخلیه ثابت باقی می‌ماند. همچنین نتایج الگوی پاشش دبی حجمی انژکتور نیز بررسی شده است و نشان می‌دهد مخروط توخالی جریان ایجاد می‌شود و با افزایش فشار، مخروط پاشش گسترده می‌شود.

۶- مراجع

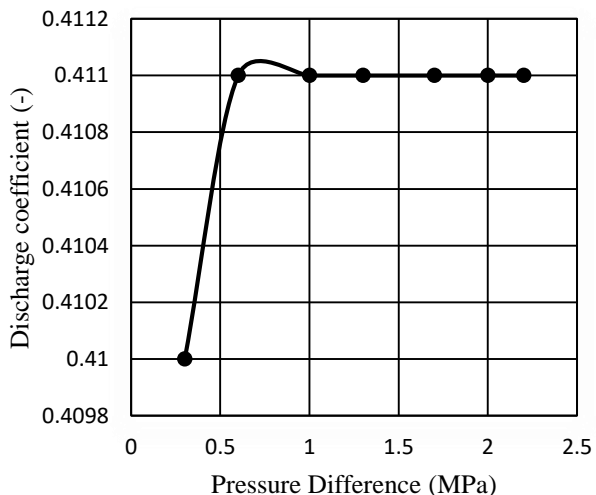
1. A. Datta, S.K. Som, Combustion and emission characteristics in a gas turbine combustor at different pressure and swirl conditions, Appl. Therm. Eng. 19 (1999) 949-967.
2. A.H.A. Hamid, R. Atan, Spray characteristics of jet-swirl nozzles for thrust chamber injector Aerosol Sci. Technol 13 (2009) 192-196.
3. Zhang, H., L. Zhou, and C. Chan, Numerical simulation of internal flow fields of swirl coaxial injector in a hot environment. Journal of computational and applied mathematics, 2011. 235(13): p. 3783-3790.
4. Goldsworthy, L. and H. Tajima, Modelling and Measurement of High Pressure Sprays, Ignition and Combustion of Heavy Fuel Oil and Marine Diesel Oil., 2007. 42(1): p. 54-62.
5. Goldsworthy, L., Computational fluid dynamics modelling of residual fuel oil combustion in the context of marine diesel engines. International Journal of Engine Research, 2006. 7(2): p. 181-199.
6. Som, S. and S.K. Aggarwal, Effects of primary breakup modeling on spray and combustion characteristics of compression ignition engines. Combustion and Flame, 2010. 157(6): p. 1179-1193.
7. Chung, Y., et al., Spray Characteristics of Closed-type Swirl Injectors with Varying Swirl Chamber Geometry. Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, 2015. 19(4): p. 8-14.
8. Schmidt, D.P., et al., Pressure-swirl atomization in the near

نتایج زاویه‌ی پاشش تجربی و عددی در جدول ۳ نشان داده شده است. در شکل ۷ دبی تجربی بر حسب فشار نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش فشار، دبی جرمی با توان درجه دو افزایش می‌یابد. در شکل ۱۱ ضریب تخلیه بر حسب فشار نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد ابتدا ضریب تخلیه افزایش یافته و سپس کاهش یافته و سپس ثابت باقی می‌ماند. ثابت ماندن ضریب تخلیه به دلیل توسعه یافته شدن جریان و تشکیل ستون هوایی کامل در مرکز انژکتور می‌باشد. ضریب تخلیه در رابطه‌ی (۵) نشان داده شده است. دبی جرمی (\dot{m}), مساحت خروجی انژکتور (A_c), چگالی سوخت (ρ) و اختلاف فشار (ΔP) می‌باشد.

$$C_D = \frac{\dot{m}}{A_c \sqrt{\rho \Delta P}} \quad (5)$$



شکل ۷ دبی جرمی تجربی بر حسب فشار



شکل ۸ ضریب تخلیه بر حسب اختلاف فشار

الگوی پاشش جریان توسط استند الگوسنج (عملکرد استند در مرجع ۱۰ ذکر شده است) در فشارهای مختلف اندازه‌گیری شده است که در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش فشار، الگوی پاشش گسترده‌تر شده و مخروط توخالی ایجاد می‌شود.

[۱۰] سینا رجبلو، پوریا میکائیکی، مصطفی کشاورزبان، «بررسی تجربی اثر هندسه خروجی بر مشخصات عملکردی انژکتور فشاری- پیچشی»، در مجموعه مقالات بیستمین کنفرانس بین المللی هوافضا، تهران، دانشگاه مالک اشتر

field. 1999, SAE Technical Paper.
9. Kyriakides, N., C. Chryssakis, and L. Kaiktsis. *Development of a Computational Model for Heavy Fuel Oil for Marine Diesel Engine Applications*. 2009. 19th Int. Multidimensional Engine Modeling User's Group Meeting at the SAE Congress.