



Journal of
Space Science, Technology
& Applications (Persian)

Vol. 1, No. 2, pp.: 66-77
2022

Available in:
Journal.isrc.ac.ir/article_146833.html

DOI:
10.22034/jssta.2022.312087.1036

Article Info

Received: 2021-10-26
Accepted: 2022-1-24

Keywords

Experimental data,
Hyperspectral images,
Leaf water content,
Remote sensing, Spectral
curve, Supervised
modelling

How to cite this article

Ali Rastgar , Hooat
Ghassemi, “Experimental
Study of Spray Merge in
Dual Pressure- Swirl
Coaxial Injectors”,
*Journal of Space Science,
Technology and
Applications*, vol 1 (2), p.:
66-77, 2022.

Original Article

Experimental Study of Spray Merge in Dual Pressure- Swirl Coaxial Injectors

Ali Rastgar¹, Hooat Ghassemi^{1*,2}

1. Aerospace Engineering Department, University of Science and Technology, Tehran, Iran, alirastegar070@gmail.com
- 2,*. Mechanical Engineering Department, University of Science and Technology, Tehran, Iran, h_ghassemi@iust.ac.ir, Corresponding author

Abstract

The purpose of this paper is to present experimental data for merging two outlet fluid skirts in a dual pressure- swirl coaxial injector. In this study, a dual pressure- swirl external mixing injector was designed and fabricated. Operational characteristics including discharge coefficient and breakup length were expressed in terms of different injection pressures for internal and external injectors. Utilizing fast shooting, based on the backlighting method, the interaction between of two outlet skirts were investigated and the merge performance map was extracted. The merge performance map results indicated, when the pressure difference of the external injector increases from 0.3 bar to 0.95 bar, the pressure difference of the internal injector for the merge to occur increases. The reason for this increase in this range of external injector injection pressure differences is that, the effect of the internal injector injection pressure for merge in this area is greater than the external injector injection pressure, the external injector skirt is pulled toward the internal injector skirt. For injection pressures difference of more than 0.95 bar in the external injector, because the effect of the external injector injection pressure for merge is greater than the internal injector injection pressure, the internal injector injection pressure difference is reduced for the merge to occur and the internal injector skirt is pulled toward the external injector skirt.

مطالعه تجربی ادغام اسپری در انژکتورهای هم‌محور دوگانه فشاری- چرخشی

علی رستگار^۱، حجت قاسمی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه علم و صنعت ، alirastegar070@gmail.com
۲. دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، h_ghassemi@iust.ac.ir (نویسنده مسئول)

چکیده

هدف از مقاله حاضر ارائه یافته‌های تجربی مربوط به شرایط لازم برای ادغام دو دامن سیال خروجی از انژکتور داخلی و خارجی در یک انژکتور هم‌محور دوگانه فشاری- چرخشی است. در این پژوهش یک انژکتور دوگانه فشاری- چرخشی اختلاط در خارج طراحی و ساخته شده است. مشخصه‌های عملکردی شامل ضریب تخلیه و طول شکست بر حسب اختلاف فشارهای تزریق مختلف برای انژکتورهای داخلی و خارجی بیان شده است. با استفاده از روش عکس‌برداری سریع و روش نوردهی پس‌زمینه به بررسی تعامل بین دو دامن سیال خروجی از انژکتور پرداخته شده و نقشه عملکرد ادغام دو دامن سیال خروجی از انژکتور استخراج شده است. از نقشه عملکرد نتیجه گرفته می‌شود، هنگامی که اختلاف فشار تزریق انژکتور خارجی از $0/3$ تا $0/95$ بار زیاد می‌شود، اختلاف فشار تزریق داخلی برای وقوع ادغام نیز افزایش می‌یابد. علت این افزایش در این محدوده از اختلاف فشار تزریق انژکتور خارجی این است که تأثیر فشار تزریق انژکتور داخلی برای ادغام، بیشتر از تأثیر فشار تزریق انژکتور خارجی است و دامن انژکتور خارجی به سمت دامن انژکتور داخلی کشیده می‌شود. برای اختلاف فشارهای تزریق بیش از $0/95$ بار در انژکتور خارجی، به دلیل این‌که تأثیر فشار تزریق انژکتور خارجی برای ادغام بیشتر از تأثیر فشار تزریق انژکتور داخلی است، اختلاف فشار تزریق انژکتور داخلی برای وقوع ادغام کاهش می‌یابد و دامن انژکتور داخلی به سمت دامن انژکتور خارجی کشیده می‌شود.



دو فصلنامه
علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال اول، شماره ۲، صفحه ۶۶-۷۷
پاییز و زمستان ۱۴۰۰

دسترس پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir/article_146833.html

DOI:
10.22034/jssta.2022.312087.1036

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۴

واژه‌های کلیدی

انژکتور هم‌محور دوگانه فشاری-
چرخشی، روش پس‌زمینه، نقشه
عملکرد ادغام

نحوه استناد به این مقاله

علی رستگار، حجت قاسمی، "مطالعه
تجربی ادغام اسپری در انژکتورهای
هم‌محور دوگانه فشاری- چرخشی"،
دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای
جلد اول، شماره دوم، صفحات فضایی،
۶۶-۷۷، ۱۴۰۰.

۱- مقدمه

انژکتورها نقش بسیار مهم و تعیین کننده‌ای را در اتمیزاسیون و اختلاط سیالات ایفا می‌کنند. با توسعه روزافزون دستگاه‌های احتراقی، انواع مختلفی از انژکتورها طراحی و برای تولید اسپری مایعات به کار گرفته می‌شوند. انژکتورهایی که در موتورهای پیشراشه مایع استفاده می‌شوند، به انواع متعددی تقسیم می‌شوند که از این میان، انژکتورهای فشاری- چرخشی دارای عملکرد مناسب در اختلاف فشارهای کم هستند [۱]. در این موتورها، دو مایع سوخت و اکسیدکننده باید به درون محفظه احتراق معرفی شوند. یکی از نیازمندی‌های حیاتی در محفظه احتراق، پیش‌آمیختگی سوخت و اکسیدکننده قبل از احتراق است. به کارگیری یک انژکتور سوخت و یک انژکتور اکسیدکننده به طور جداگانه منجر به اختلاط نایک‌نواختی می‌شود اما هم‌محور کردن انژکتور سوخت و اکسیدکننده می‌تواند فواید زیادی از جمله اشغال فضای کم، اختلاط مناسب با نسبت یکنواخت پیشراشه‌ها و در نتیجه افزایش بازده احتراق را داشته باشد. در انژکتورهای هم‌محور دوگانه فشاری- چرخشی^۱، اسپری خروجی شامل یک اسپری داخلی است که توسط یک اسپری هم‌مرکز چرخشی خارجی احاطه شده است. در اختلاف فشار تزریق بسیار کم، دامن‌های مایع از یکدیگر جدا هستند. با افزایش اختلاف فشار تزریق، دامن‌های مایع در خروجی دهانه انژکتور داخلی و خارجی، در شرایط خاصی با هم ادغام^۲ می‌شوند. این تغییرات فشار به اثرات اجکتور^۳ نسبت داده می‌شود [۲]. ادغام اسپری‌های هم‌محور یکی از راه‌های کارآمد برای دستیابی به اختلاط مناسب در محفظه احتراق شناخته شده است. با ادغام اسپری‌های هم‌محور کیفیت بهتری از اتمیزه کردن و توزیع سوخت و اکسیدکننده در ناحیه نزدیک به دهانه خروجی انژکتور به دست می‌آید. این نیاز به ویژه برای پیشراشه‌های هایدرولیک مهم است. این نوع انژکتورها از نظر عملی برای موتورهای رانش متغیر، از جمله تراسترهای ماهواره‌ها

برای کنترل مدار مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳]. مطالعه‌ای تجربی توسط سیواکومار^۴ و همکاران [۲، ۳ و ۴] به منظور شناخت تعامل دامن‌های خروجی از انژکتور هم‌محور گریز از مرکز صورت گرفت. آن‌ها به بررسی فرایندهای ادغام، جدایش و هیستریزیس^۵ پرداختند و نشان دادند که با رویداد هیستریزیس، تغییرات شدید در ویژگی‌های اسپری ایجاد می‌شود. این امر ناشی از اثرات کشش سطحی است که به هر حال بررسی بیشتر را می‌طلبد. بسیاری از این ویژگی‌ها و همچنین ویژگی‌های حرکت نقطه تماس را می‌توان به تغییراتی که در فشار استاتیک بین فضای دو دامن ایجاد می‌شود، نسبت داد. هان^۶ و همکاران [۵] اثرات طول فرورفتگی^۷ انژکتور چرخشی هم‌محور دوگانه را بر روی مشخصه‌های اختلاط، در شرایط اتمسفریک بررسی کردند. مشاهدات حاکی از آن بود، اختلاط و توزیع جرمی مؤلفه‌ها، حساسیت زیادی به طول فرورفتگی انژکتور دارد. همچنین قطر متوسط قطرات با افزایش طول فرورفتگی اندکی کاهش می‌یابد. کیم^۸ و همکاران [۶] نشان دادند با افزایش طول فرورفتگی، اختلاط بین پیشراشه‌ها در خروجی نازل انژکتور از اختلاط خارجی، به داخلی تغییر می‌یابد. با افزایش درجه اختلاط داخلی، بازده احتراق به عنوان نتیجه‌ای از اختلاط پیشراشه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد، تغییر طول فرورفتگی به طور قابل توجهی بر ویژگی‌های نوسان فشار احتراق در داخل محفظه احتراق تأثیر می‌گذارد. مطالعه‌ای تجربی در خصوص انژکتور هم‌محور دوگانه چرخشی مایع- مایع توسط رمضان^۹ و همکاران [۷] صورت گرفت. آن‌ها نشان دادند، زاویه اسپری ترکیبی بین زاویه‌های اسپری‌های داخلی و خارجی است، همچنین از تعادل مومنتوم بین دو اسپری برای پیش‌بینی زاویه اسپری ترکیبی استفاده کردند. امی و همکاران [۸] روشی را برای طراحی انژکتور چرخشی ارائه کردند. روش ارائه شده توسط آن‌ها مبتنی بر روش طراحی شده توسط بازاروف^۹ و یانگ^{۱۰} [۹] است.

6 Han
7 Recess Lengths
8 Kim
9 Bazarov
10 Yang

1 Dual Pressure- Swirl Coaxial Injectors
2 Merge
3 Ejector Effects
4 Sivakumar
5 Hysteresis

در مطالعه‌ای که توسط سئو^۱ و همکاران [۱۰] صورت گرفت، آزمایش‌های احتراق با استفاده از انژکتور هم‌محور چرخشی با اکسیژن مایع و کروسین انجام شد. در این مطالعه، دو پارامتر مهم تجربی از جمله طول فرورفتگی و شکل محفظه چرخش سوخت بررسی شد. پناهی‌بخش و همکاران [۱۱] یک انژکتور چرخشی دوگانه اختلاط در خارج را با استفاده از کد کامپیوتری طراحی کردند. در نهایت به منظور اعتبارسنجی، نتایجی که از طراحی به دست آمد با انژکتور یک موتور موجود مقایسه شد. ژائو^۲ و همکاران [۱۲] از ابزار نوری برای بررسی خصوصیات اتمیزاسیون انژکتورها هم‌محور گریز از مرکز استفاده کردند. آن‌ها به این موضوع دست یافتند که قطر میانگین ذرات اسپری با افزایش اختلاف فشار تزریق کاهش می‌یابد، اما این کاهش تمایل دارد به آهستگی انجام شود و وقتی اسپری به موقعیت خاصی از خروجی انژکتور می‌رسد، قطر میانگین ذرات اسپری در جهت محوری دائماً حفظ می‌شود. یک مطالعه‌ای عددی توسط ونگ^۳ و همکاران [۱۳] صورت گرفت که ویژگی‌های اختلاط و احتراق در انژکتورهای هم‌محور چرخشی با سیال اکسیژن مایع و کروسین، تحت شرایط فوق بحرانی بررسی شد. در این مطالعه مشخص شد، ضخامت نازل انژکتور داخلی و فاصله آن با نازل انژکتور خارجی به طور قابل‌توجهی بر رفتار اختلاط اسپری تأثیر می‌گذارد. لی^۴ و همکاران [۱۴] مطالعه‌ای تجربی به منظور بررسی تأثیر فشار تزریق بر روی خصوصیات اسپری و تعامل دامن‌های مایع یک انژکتور چرخشی هم‌محور انجام دادند. مشخص شد، ساختار اسپری هم‌محور با اسپری جداگانه خروجی هر یک از این انژکتورها متفاوت است و در واقع تعامل بین فیلم مایع انژکتور داخلی با انژکتور خارجی باعث تجزیه می‌شود. اسپری ناشی از انژکتور داخلی ناپایدارتر و تجزیه آن آسان‌تر است زیرا مومنتوم بیشتری دارد. برای اسپری جداگانه و اسپری هم‌محور، فرکانس موج با افزایش فشار تزریق افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ای که توسط آهن^۵ و همکاران [۱۵] انجام شد، یک مطالعه تجربی و تئوری به منظور بررسی اثرات طول فرورفتگی، جهت چرخش و نسبت دبی جرمی، بر روی زاویه

اسپری انژکتور هم‌محور چرخشی انجام شد. نتایج نشان می‌دهد، زاویه اسپری به طور قابل‌توجهی به طول فرورفتگی و نسبت دبی جرمی اختلاط بستگی دارد و برای اختلاط در داخل، جهت چرخش تأثیر به‌سزایی بر روی زاویه خروج دارد. در مطالعه‌ای که توسط رادکه^۶ و همکاران [۱۶] صورت گرفت، ویژگی‌های اسپری یک انژکتور هم‌محور دوگانه با استفاده از روش‌های غیر تهاجمی نوری، لیزر و اشعه ایکس بررسی شد.

از مطالعات فوق می‌توان نتیجه گرفت، تحقیقات کمی در خصوص پدیده ادغام اسپری در انژکتورهای هم‌محور دوگانه چرخشی مایع-مایع اختلاط در خارج صورت گرفته است. درک رفتار و شرایط ادغام دامن‌های مایع در انژکتورها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار و نیازمند پژوهش‌های بیشتری است. از این‌رو، مطالعه‌ای تجربی به منظور بررسی پدیده ادغام دامن‌های مخروطی مایع تشکیل شده توسط یک انژکتور دوگانه فشاری-چرخشی اختلاط در خارج، برای شرایط مختلف جریان انجام شده است. در انژکتورهای هم‌محور دوگانه چرخشی اختلاط در خارج، شرایطی که دو دامن خروجی با یکدیگر ادغام می‌شوند، نقطه کاری انژکتور است.

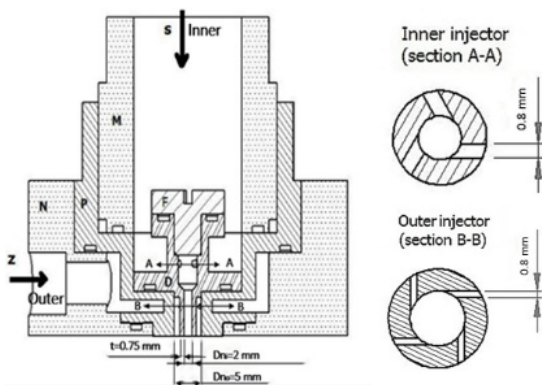
انژکتور هم‌محور دوگانه چرخشی از یک انژکتور داخلی و یک انژکتور خارجی چرخشی به صورت هم‌مرکز تشکیل شده است که در آن طول نازل انژکتور داخلی نسبت به طول نازل انژکتور خارجی فرورفتگی ندارد یا مقدار کمی فرورفتگی دارد. سیال از طریق ورودی‌های مماسی که بر دیواره محفظه چرخش هر انژکتور قرار دارد، وارد محفظه چرخش انژکتورهای داخلی و خارجی می‌شود. مومنتوم زاویه‌ای که بر روی مایع اعمال می‌شود، منجر به حرکت چرخشی سیال می‌شود. تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز، به دلیل مؤلفه مماسی سرعت، یک دامن مخروطی توخالی دوار توسط انژکتور داخلی و خارجی به صورت هم‌مرکز شکل می‌گیرد. از آنجاکه یک دامن مایع داخلی در داخل دامن مایع خارجی قرار گرفته، افزایش ورود گاز پیرامون (هوا) به ناحیه حلقوی بین

4 Lie
5 Ahn
6 Radke

1 Seo
2 Zhao
3 Wang

۲-۱- طرح انژکتور

نمایی از انژکتور هم‌محور مایع- مایع طراحی شده در این مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. انژکتور داخلی دارای سه ورودی مماسی به قطر ۰/۸ میلی‌متر و انژکتور خارجی دارای چهار ورودی مماسی به قطر ۰/۸ میلی‌متر است. قطر نازل انژکتور داخلی و خارجی به ترتیب ۲ و ۵ میلی‌متر و ضخامت نازل انژکتور داخلی ۰/۷۵ میلی‌متر است. از دو ورودی جداگانه برای تأمین سیال انژکتور داخلی و خارجی استفاده می‌شود. روش ارائه شده برای طراحی انژکتور در این پژوهش، مبتنی بر روش طراحی توسط بازاروف و یانگ است [۹]. در این روش تعدادی از پارامترها توسط طراح و با توجه به شرایط عملکردی انتخاب می‌شوند و همچنین سایر پارامترها با استفاده از روابط و نمودارهای تجربی موجود به دست می‌آیند. برای طراحی انژکتور اختلاط در خارج، اگر نازل انژکتور داخلی درون حفره هوا انژکتور خارجی قرار بگیرد، هر دو انژکتور از نظر هیدرولیکی مستقل هستند و مانند روش‌های موجود در طراحی انژکتور فشاری- چرخشی تک‌گانه، انژکتور داخلی و خارجی طراحی می‌شوند.



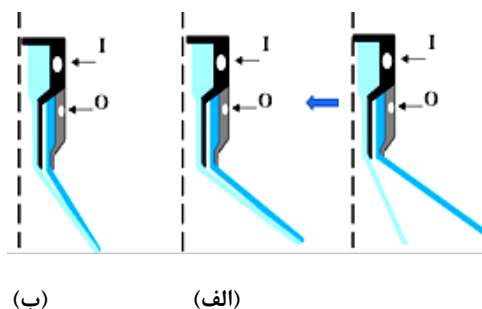
شکل ۲. نمایی از انژکتور هم‌محور مایع- مایع

۲-۲- مجموعه آزمایش و روش انجام آزمایش

شکل ۳ طرح‌واره‌ای از مجموعه تجهیزات آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. تجهیزات موجود در سمت چپ تصویر برای تأمین دبی انژکتور داخلی و تجهیزات موجود در سمت راست تصویر برای تأمین دبی انژکتور خارجی در نظر گرفته شده است. مجموعه تجهیزات آزمایشگاهی شامل عناصر زیر است: ۱. دو کپسول گاز نیتروژن با تحمل فشار ۱۵۰ بار، ۲. دو رگلاتور (رگلاتور نیتروژن هرکولس برنجی، فشارشکن هرکولس با فشار ورودی ۲۰۰ بار و

دامن‌های مایع همراه با افت فشار استاتیک ایجاد می‌شود. از آنجا که ورود هوا تحت تأثیر شرایط جریان دامن‌های مایع است، در شرایط جریان داخلی قویتر، افت فشار استاتیک بزرگتری در ناحیه حلقوی رخ می‌دهد. در شرایط جریان داخلی قویتر، دو دامن مایع به یکدیگر نزدیک می‌شوند و جریان هوا را به داخل ناحیه حلقوی مسدود می‌کنند. افت بیشتر فشار استاتیک، منجر به تماس دامن‌های مایع داخلی و خارجی می‌شود [۴].

با توجه به شکل ۱ در ادغام اسپری خروجی از انژکتور هم‌محور، دو رفتار متفاوت مشاهده می‌شود. هنگامی که رژیم جریان انژکتور خارجی قویتر از رژیم جریان از انژکتور داخلی باشد، دامن انژکتور داخلی به سمت دامن انژکتور خارجی کشیده می‌شود؛ اما هنگامی که رژیم جریان انژکتور داخلی قویتر باشد، دامن انژکتور خارجی به سمت دامن انژکتور داخلی کشیده می‌شود.

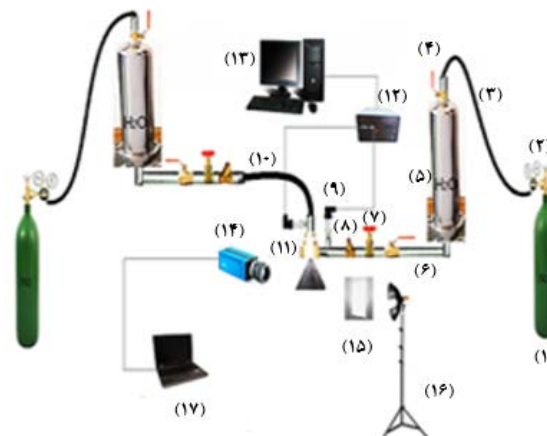


شکل ۱. الف) کشیده شدن دامن انژکتور داخلی به سمت دامن انژکتور خارجی ب) کشیده شدن دامن انژکتور خارجی به سمت دامن انژکتور داخلی

۲- معرفی مجموعه آزمایشگاهی

در این بخش، طرح انژکتور مطالعه شده در این پژوهش ارائه می‌شود. همچنین به معرفی مجموعه تجهیزات و نحوه انجام آزمایش پرداخته می‌شود.

تنظیم فشار خروجی ۰ تا ۵۰ بار با دقت اندازه‌گیری ۱ میلی‌بار و اتصال ۱/۴ اینچ (راست‌گرد)، ۳. دو شیلنگ هیدرولیک فشار قوی به طول ۱/۵ متر، ۴. چهار شیر گازی برنجی ۱/۲ اینچ، ۵. دو مخزن سیال تحت فشار که قادر است تا فشار ۱۰۰ بار را تحمل کند. ۶. دو لوله آب گالوانیزه به طول یک متر، ۷. دو شیر پروانه‌ای برنجی ۱/۲ اینچ، ۸. دو صافی برنجی ۱/۲ اینچ، ۹. دو سنسور فشار هاگلر ۱۶ بار جریان‌ی HOTH0016FGK، ۱۰. شیلنگ هیدرولیک فشار قوی به طول ۱ متر، ۱۱. انژکتور، ۱۲. داده‌بردار 1751-Advantech PCIE، ۱۳. کامپیوتر، ۱۴. دوربین عکس‌برداری PCO با زمان نوردهی ۱۰ تا ۲۰ میکرو ثانیه با لنز ماکرونیکن به فاصله کانونی ۱۰۰ میلی‌متر، ۱۵. فیلتر یکنواخت کننده نور، ۱۶. منبع نور (نورافکن ۱۰۰۰ وات)، ۱۷. لپ‌تاپ برای کنترل دوربین. همچنین از آب به عنوان سیال عامل برای بررسی تعامل دامن‌های خروجی از انژکتور استفاده شده است.



شکل ۳. چیدمان تجهیزات آزمایشگاهی

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ابتدا سیال آب از طریق شیر گازی (۴) که در بالای مخزن تعبیه شده، وارد مخزن (۵) می‌شود. آب درون مخزن از طریق یک شیلنگ هیدرولیک (۳) که از یک طرف به مخزن آب و سر دیگر آن به مخزن نیتروژن متصل است، تحت فشار قرار می‌گیرد. از یک رگلاتور (۲) برای

تنظیم فشار گاز در خروجی مخزن نیتروژن استفاده می‌شود. در انتهای مخزن آب، لوله‌ای (۶) وصل شده است. در این مسیر از یک شیر گازی و یک شیر پروانه‌ای (۷) برای کنترل دبی و از یک صافی (۸) برای جلوگیری از ورود ذرات استفاده شده است. سر دیگر لوله به انژکتور (۱۱) وصل می‌شود که در واقع این مسیر برای تأمین سیال ورودی انژکتور خارجی است. درست قبل از انژکتور یک سنسور فشار (۹) نصب می‌شود که به مجموعه داده‌برداری (۱۲) وصل می‌شود. مسیر تأمین آب برای انژکتور داخلی با یک تفاوت جزئی، مانند مسیر انژکتور خارجی است.

با تقسیم جرم سیال خروجی بر هر یک از زمان‌های آزمایش در هر فشار، دبی تجربی به دست می‌آید. برای دقت، هر آزمایش با ۳ بار تکرار و در مدت زمان ۳۰ ثانیه انجام شده است.

در انژکتورهای فشاری - چرخشی به دلیل شکل‌گیری حفره هوا^۱ درون انژکتور، ضخامت فیلم سیال در قسمت دهانه خروجی نازل کم است. از این‌رو مقدار ضریب تخلیه در این انژکتورها کم است. ضریب تخلیه انژکتور از نسبت دبی تجربی به دبی تئوری، به دست می‌آید. دبی تئوری از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$\dot{m} = A_n (2\rho\Delta P)^{1/2} \quad (1)$$

برای اندازه‌گیری طول شکست^۲ از نرم‌افزار دیجی‌مایزر^۳ استفاده شده است. طول شکست از ناحیه خروجی انژکتور تا ناحیه‌ای که دامن سیال به صورت پیوسته است، در راستای عمودی اندازه‌گیری شده است. برای دقت در اندازه‌گیری هر طول شکست از میانگین ۳ بار اندازه‌گیری به دست آمده است.

³ Digimizer

¹ Air Core

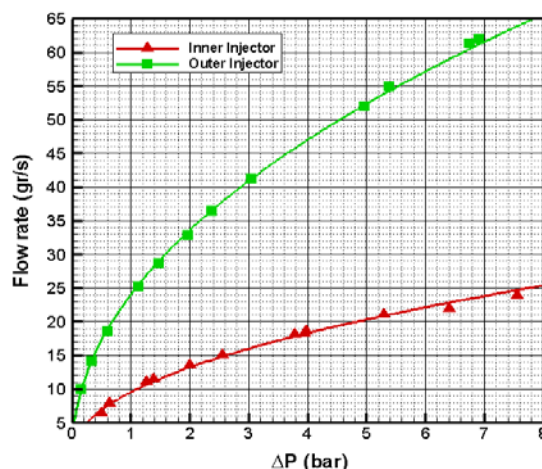
² Breakup Length

۳- نتایج آزمایش و تحلیل آزمایش‌ها

در این بخش به تفسیر مشخصه‌های عملکردی دبی، ضریب تخلیه، طول شکست و همچنین به نقشه عملکرد ادغام اسپری خروجی پرداخته می‌شود.

۳-۱- اندازه‌گیری دبی

منحنی تغییرات دبی جرمی برای انژکتور داخلی و خارجی بر حسب اختلاف فشارهای تزریق مختلف توسط سیال آب در شکل ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود دبی انژکتورهای داخلی و خارجی به عنوان تابعی با جذر فشار، با افزایش اختلاف فشار تزریق افزایش می‌یابد. با توجه به منابع موجود و کارهای انجام شده، این انژکتور برای ادغام در اختلاف فشارهای تزریق و مقدار دبی‌های کم طراحی شده است.

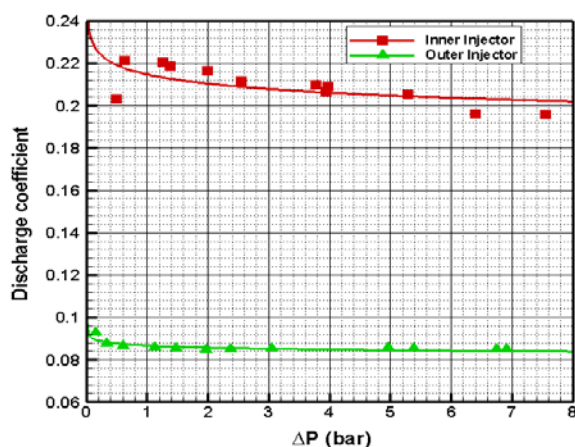


شکل ۴. تغییرات دبی جرمی با اختلاف فشار تزریق برای انژکتور داخلی و خارجی

۳-۲- اندازه‌گیری ضریب تخلیه

منحنی تغییرات ضریب تخلیه برای انژکتور داخلی و خارجی بر حسب اختلاف فشارهای تزریق مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد، ضریب تخلیه با افزایش اختلاف

فشار تزریق برای انژکتور خارجی تقریباً ثابت و برای انژکتور داخلی با شیب ناچیزی کاهش می‌یابد.



شکل ۵. تغییرات ضریب تخلیه با اختلاف فشار تزریق برای انژکتور داخلی و خارجی

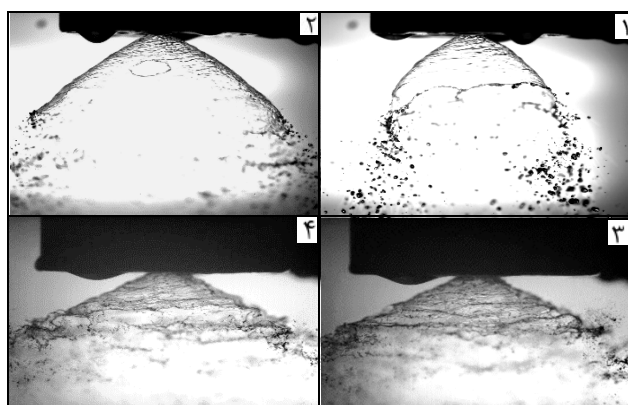
۳-۳- اندازه‌گیری طول شکست

با توجه به شکل ۶، هنگامی که دامن مخروطی سیال از انژکتور خارج می‌شود تحت تأثیر نیروی آئروپدینامیکی قرار می‌گیرد.

موج‌هایی که بر روی دامن ایجاد می‌شوند، منجر به ناپایداری دامن مایع شده و مایع به شکل قطرات و همچنین رشته‌های باریک^۱، از لبه دامن جدا می‌شوند. این شکست دامن مایع به فروپاشی اولیه موسوم است. رشته‌های باریک و قطرات درشت، همان‌طور که در طول مسیر حرکت می‌کنند تحت تأثیر نیروی آئروپدینامیکی قرار گرفته و از هم جدا شده و به قطره‌های کوچک‌تری تبدیل می‌شوند. به این نوع شکست ساختار مایع، فروپاشی ثانویه گفته می‌شود. اندازه این قطرات به عواملی از جمله سرعت خروجی سیال، هندسه انژکتور، خواص سیال و محیطی که انژکتور که در آن محیط پاشش می‌شود، بستگی دارد.

کاهش پیدا می‌کند و شکل پیاپی دامن تبدیل به یک گل لاله می‌شود. در فشار تزریق بیشتر شکل ۷-۴، موج‌هایی بر روی دامن خروجی مشاهده می‌شود، اغتشاشات در بالادست و نیروی آیرودینامیکی وارده بر دامن خروجی، عامل به وجود آورنده موج‌های ناپایدار بر سطح دامن خروجی هستند. در این حالت نیروی آیرودینامیکی بر نیروی کشش سطح مایع غلبه می‌کند و موجب کوتاه‌تر شدن طول شکست دامن خروجی می‌شود.

شکل ۸ فروپاشی دامن خروجی از انژکتور خارجی را در فشارهای تزریق مختلف نشان می‌دهد.



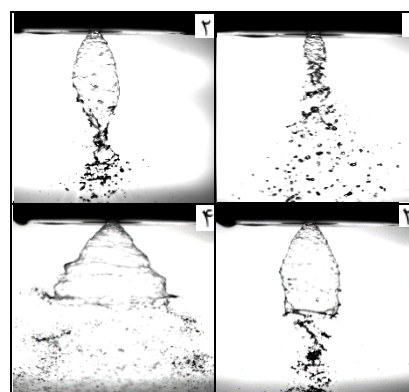
شکل ۸. فروپاشی دامن خروجی از انژکتور خارجی
 (۱) $\Delta P_i = 0.4 \text{ (bar)}$, $\Delta P_o = 0.8 \text{ (bar)}$ (۲) $\Delta P_i = 0.4 \text{ (bar)}$, $\Delta P_o = 2.3 \text{ (bar)}$ (۳) $\Delta P_i = 0.4 \text{ (bar)}$, $\Delta P_o = 5.5 \text{ (bar)}$ (۴)

نتایج نشان می‌دهد دامن‌های مایع به سه حالت از هم فرو می‌پاشند که به عنوان دامن با لبه ضخیم، دامن حفره‌دار و دامن موج مشاهده شده است. مرجع [۱۷] به طور مشابه این سه حالت از فروپاشی دامن مایع را تایید می‌کند. شکل ۹ تغییرات طول شکست دامن خروجی از انژکتور داخلی و خارجی را با افزایش اختلاف فشارهای تزریق مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۶. نمایی از روند فروپاشی دامن مخروطی

شکل ۷ فروپاشی مخروط مایع خروجی از انژکتور داخلی را در فشارهای تزریق مختلف نشان می‌دهد که به روش عکس‌برداری پس‌زمینه گرفته شده است.

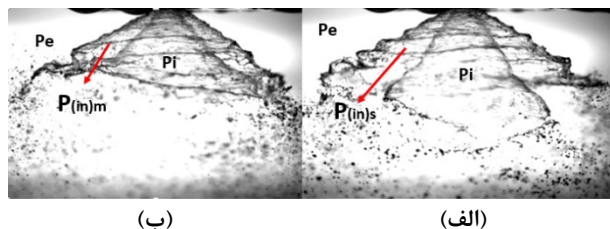


شکل ۷. فروپاشی دامن خروجی از انژکتور داخلی
 (۱) $\Delta P_i = 0.5 \text{ (bar)}$, $\Delta P_o = 0.7 \text{ (bar)}$ (۲) $\Delta P_i = 0.7 \text{ (bar)}$, $\Delta P_o = 1.4 \text{ (bar)}$ (۳) $\Delta P_i = 0.7 \text{ (bar)}$, $\Delta P_o = 3.0 \text{ (bar)}$ (۴)

نتایج نشان می‌دهد، در اختلاف فشار تزریق بسیار کم شکل ۷-۱، یک حباب بسیار ریزی در دهانه خروجی از انژکتور داخلی که قطره‌های آب به طور پیوسته پس از آن در حال تجزیه هستند، تشکیل شده است. با افزایش اختلاف فشار تزریق شکل ۷-۲، حباب بسیار ریز در دهانه خروجی انژکتور، شکل پیاپی به خود می‌گیرد علاوه بر این، طول حباب که به عنوان طول شکست برای این حالت در نظر گرفته می‌شود، با افزایش فشار تزریق، افزایش پیدا می‌کند. با توجه به شکل ۷-۳، هنگامی که اختلاف فشار تزریق بیشتر از حالت قبل می‌شود، طول شکست دامن سیال

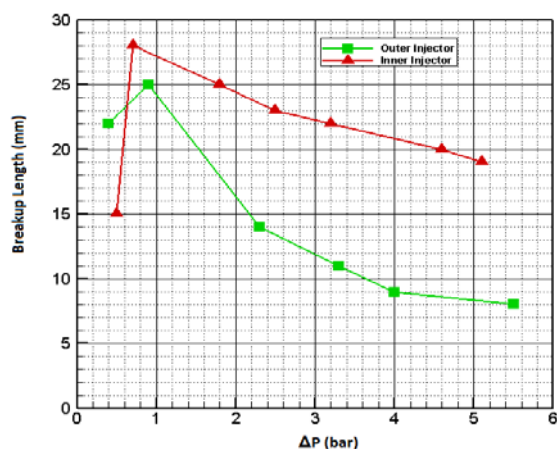
۳-۴- نقشه عملکرد ادغام

شکل ۱۰ لحظه شروع ادغام (یعنی برخورد) دو دامن خروجی سیال را هنگامی که فشار تزریق انژکتور داخلی ثابت (برابر با ۱/۱ بار) و فشار تزریق انژکتور خارجی افزایش می‌یابد، نشان می‌دهد. با افزایش فشار تزریق انژکتور خارجی، سرعت سیال در خروجی افزایش و فشار استاتیک بین دو دامن مایع کاهش می‌یابد و به مقدار فشار لازم برای ادغام دو دامن می‌رسد.



شکل ۱۰. ادغام دو دامن سیال خروجی از انژکتور
(الف) $\Delta P_i = 1/1$ (bar) (ب) $\Delta P_o = 1/4$ (bar)

شکل ۱۱ تعامل دو دامن خروجی انژکتور را هنگامی که فشار تزریق انژکتور خارجی ثابت (برابر با ۰/۷ بار) و فشار تزریق انژکتور داخلی افزایش می‌یابد، نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۱، در ابتدا هیچ برخوردی بین دو دامن خروجی انژکتور داخلی و خارجی مشاهده نمی‌شود؛ اما هنگامی که اختلاف فشار تزریق انژکتور داخلی ۱/۴ بار می‌شود دو دامن خروجی سیال با یکدیگر ادغام می‌شوند و با افزایش فشار تزریق انژکتور داخلی دو دامن خروجی در حالت ادغام باقی می‌مانند. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش فشار تزریق انژکتور داخلی، دامن انژکتور خارجی به سمت دامن انژکتور داخلی کشیده می‌شود.



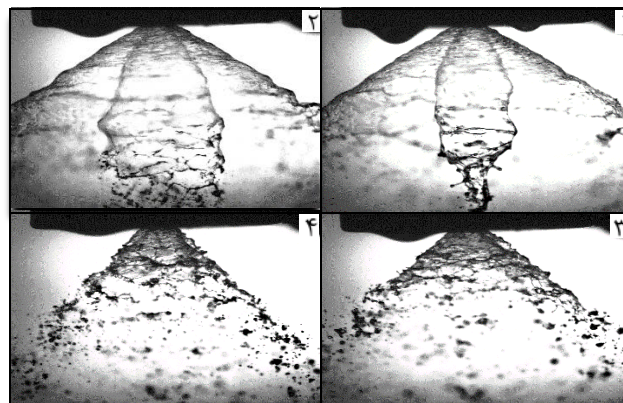
شکل (۹): تغییرات طول شکست با افزایش اختلاف فشار تزریق برای دامن خروجی از انژکتور داخلی و خارجی

نتایج نشان می‌دهد طول شکست دامن خروجی از انژکتور خارجی، کمتر از انژکتور داخلی است. با افزایش اختلاف فشار تزریق، طول شکست دامن خروجی برای هر دو انژکتور ابتدا افزایش و سپس به طور پیوسته کم می‌شود. با توجه به شکل ۷، برای فشارهای کمتر از ۱/۵ بار، اتمیزاسیون و به تبع آن طول شکست به دلیل اتمیزاسیون ضعیف قابل توجه نیست. از این رو، شرایط کاری برای این انژکتور برای اختلاف فشارهای بیشتر از ۱.۵ بار است.

علت افزایش طول شکست برای دامن خروجی از انژکتور داخلی و خارجی، همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، تغییر شکل سیال در خروج از انژکتور است. با توجه به شکل ۹، پس از نقطه حداکثر برای هر دو دامن خروجی با افزایش اختلاف فشار تزریق، طول شکست کم می‌شود. با توجه به شکل‌های ۷ و ۸، هرچقدر طول شکست کمتر باشد موج‌های بیشتری روی دامن مخروطی مایع ظاهر می‌شوند؛ این موضوع منجر به ناپایداری دامن مایع خواهد شد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت رابطه‌ای بین طول شکست با موج‌هایی که بر روی سطح دامن تشکیل می‌شوند، وجود دارد.

برای به دست آوردن نقشه عملکرد ادغام، انژکتور خارجی را در یک فشار ثابت قرار داده و فشار پشت انژکتور داخلی به طور آهسته افزایش می‌یابد، هنگامی که دو دامن سیال با یکدیگر ادغام می‌شوند، فشار تزریق نقاط برخورد تعیین و ثبت می‌شوند. این روند برای دیگر نقاط فشار تزریق انژکتور خارجی تکرار شده است. از این‌رو، نقشه عملکرد ادغام دو دامن سیال خروجی انژکتور هم‌محور چرخشی به دست می‌آید. با توجه به شکل ۱۳، هنگامی که اختلاف فشار تزریق انژکتور خارجی از ۰/۳ تا ۰/۹۵ بار افزایش می‌یابد، اختلاف فشار تزریق انژکتور داخلی برای وقوع ادغام افزایش می‌یابد. علت این افزایش، در این محدوده از اختلاف فشار تزریق انژکتور خارجی این است که تأثیر فشار تزریق انژکتور داخلی برای ادغام بیشتر از تأثیر فشار تزریق انژکتور خارجی است.

نمونه‌ای از این انحراف در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود؛ یعنی تا قبل از اختلاف فشار تزریق ۰/۹۵ بار برای انژکتور خارجی، دامن انژکتور داخلی بر روی دامن انژکتور خارجی تأثیر می‌گذارد. همچنین با توجه به شکل ۱۳، بعد از اختلاف فشار تزریق ۰/۹۵ بار در انژکتور خارجی، به دلیل اینکه تأثیر فشار تزریق انژکتور خارجی برای ادغام بیشتر از تأثیر فشار تزریق داخلی است، اختلاف فشار تزریق انژکتور داخلی برای وقوع ادغام کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۲، با افزایش اختلاف فشار تزریق انژکتور خارجی، فشار اطراف دامن انژکتور خارجی کاهش یافته و دامن داخلی جذب دامن خارجی می‌شود. در واقع تأثیر دامن انژکتور خارجی برای ادغام بیشتر از دامن انژکتور داخلی است. لازم به ذکر است با توجه به شکل ۱۳، نقاط دایره‌ای شکل و بالای این نقاط دو دامن خروجی با یکدیگر در شرایط ادغام و در پایین این نقاط دو دامن خروجی جدا از هم هستند. از نقشه عملکرد به دست آمده می‌توان اختلاف فشار لازم برای ادغام دو دامن انژکتورهای داخلی و خارجی را تعیین کرد. نکته بسیار مهم در این نقشه، تعیین حالتی است که دامن خارجی و دامن داخلی هم دیگر را جذب می‌کنند. در این حالت بیشتر پخش فضایی همراه با اختلاط دو مایع به دست خواهد آمد.

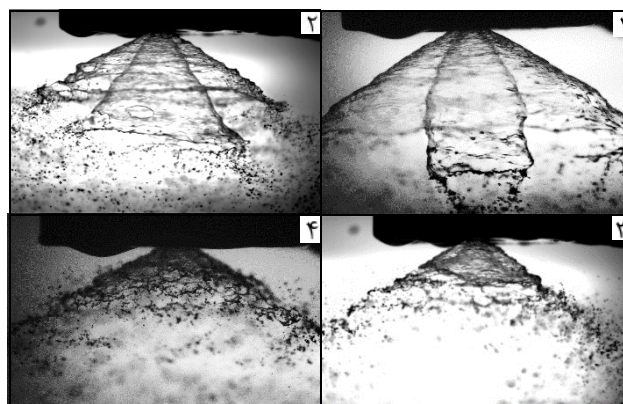


شکل ۱۱: ادغام دو دامن سیال خروجی از انژکتور

$\Delta P_i = 0.7$ (bar) (۱)، $\Delta P_i = 0.8$ (bar) (۲)، $\Delta P_i = 1.1$ (bar)

(۳) $\Delta P_i = 1.4$ (bar) (۴)، $\Delta P_i = 2.2$ (bar)

شکل ۱۲ تعامل دو دامن خروجی انژکتور را هنگامی که فشار تزریق انژکتور داخلی ثابت (برابر با ۱/۱ بار) و فشار تزریق انژکتور خارجی افزایش می‌یابد، نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۲، در ابتدا هیچ برخوردی بین دو دامن سیال خروجی اتفاق نمی‌افتد. با افزایش اختلاف فشار تزریق انژکتور خارجی به ۱/۱ بار، مشاهده می‌شود دو دامن سیال خروجی همچنان در حالت جدایش قرار دارند. با افزایش فشار تزریق انژکتور خارجی به ۱/۴ بار، دو دامن خروجی با یکدیگر ادغام می‌شوند. همچنین با افزایش فشار تزریق انژکتور خارجی مشاهده می‌شود، دامن انژکتور داخلی به سمت دامن انژکتور خارجی کشیده می‌شود.



شکل ۱۲. ادغام دو دامن سیال خروجی از انژکتور

$\Delta P_i = 1.1$ (bar) (۱)، $\Delta P_i = 0.7$ (bar) (۲)، $\Delta P_i = 1.1$ (bar)

(۳) $\Delta P_i = 1.4$ (bar) (۴)، $\Delta P_i = 4.3$ (bar)

فهرست علائم اختصاری

انژکتور داخلی	D
درپوش انژکتور داخلی	F
انژکتور خارجی	P
محفظه تأمین دبی برای انژکتور داخلی	M
محفظه تأمین دبی برای انژکتور خارجی	N
مسیر ورود سیال برای تأمین دبی انژکتور داخلی	S
مسیر ورود سیال برای تأمین دبی انژکتور خارجی	Z
جرم مخصوص سیال، kg/m^3	ρ
مساحت قطر خروجی نازل، m^2	A_n
اختلاف فشار تزریق برای انژکتور داخلی، bar	ΔP_i
اختلاف فشار تزریق برای انژکتور خارجی، bar	ΔP_o
فشار درون دامن مخروطی انژکتور داخلی، bar	P_i
فشار بیرون دامن مخروطی انژکتور خارجی، bar	P_e
فشار بین دو دامن مخروطی در حالت جدایش، bar	$P(\text{in})_s$
فشار بین دو دامن مخروطی در حالت ادغام، bar	$P(\text{in})_m$
دبی جرمی، kg/s	m'

تعارض منافع

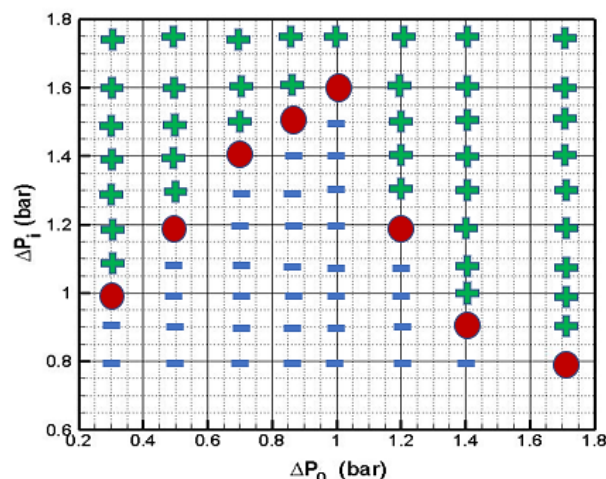
هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

تشکر و قدردانی

اد

مراجع

- [1] E. Valizadeh, and S. M. Mousavi Nainiyan, "Experimental determination of the suitable rang of injectors used in the vortex combustion chamber in liquid rocket engine," Aerospace Knowledge and Technology Journal, vol. 6, no. 1, pp. 25-39, 2017.
- [2] D. Sivakumar, and B. Raghunandan, "Jet interaction in liquid-liquid coaxial injectors," 1996.
- [3] D. Sivakumar, and B. Raghunandan, "Formation and separation of merged liquid sheets developed from the mixing of coaxial swirling liquid sheets," Physics of Fluids, vol. 15, no. 11, pp. 3443-3451, 2003.



شکل ۱۳. نقشه عملکرد ادغام دو دامن سیال خروجی از انژکتور هم محور دو گانه فشاری چرخشی

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، یک انژکتور هم محور دو گانه فشاری- چرخشی با کاربرد در موتورهای پیشرانه مایع ساخته و به صورت تجربی بررسی شده است. با استفاده از آب به عنوان سیال در هر دو انژکتور داخلی و خارجی، به کمک روش عکس برداری پس زمینه تعامل دامن های خروجی مطالعه شد. مشخصه های عملکردی مانند ضریب تخلیه و طول شکست بر حسب اختلاف فشار تزریق برای انژکتورهای داخلی و خارجی به دست آمد. نتایج نشان می دهند:

- برای اختلاف فشار یکسان، طول شکست دامن خروجی از انژکتور خارجی کمتر از انژکتور داخلی است.
- پس از تشکیل حالت دائمی دامن با افزایش اختلاف فشار تزریق، طول شکست دامن خروجی برای هر دو انژکتور کم می شود.
- هرچه قدر طول شکست کمتر باشد، موج های ناپایدار بیشتری بر روی سطح دامن خروجی از انژکتور ظاهر می شود. همچنین در این مطالعه، نقشه عملکرد انژکتور برای ادغام به دست آمده است.

شیراز، موسسه بین‌المللی آموزشی و پژوهشی خوارزمی
صفاشهر، ۱۳۹۲.

- [12] F. Zhao, X. Li, Z. Ren et al., "Study on atomization characteristic of dual-orifice pressure-swirl injector." p. 012012.
- [13] X. Wang, and V. Yang, "Supercritical mixing and combustion of liquid-oxygen/kerosene bi-swirl injectors," Journal of Propulsion and Power, vol. 33, no. 2, pp. 316-322, 2017.
- [14] J.W. Ding, G.X. Li, and Y.S. Yu, "The instability and droplet size distribution of liquid-liquid coaxial swirling spray: An experimental investigation," Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 82, pp. 166-173, 2017.
- [4] D. Sivakumar, and B. Raghunandan, "Hysteretic interaction of conical liquid sheets from coaxial atomizers: Influence on the spray characteristics," Physics of Fluids, vol. 10, no. 6, pp. 1384-1397, 1998.
- [5] P.G. Han, J.H. Seol, S.H. Hwang et al., "The spray characteristics of swirl coaxial injectors." p. 490.
- [6] S.H. Kim, Y.M. Han, S. Seo et al., "Effects of LOX post recess on the combustion characteristics for Bi-swirl coaxial injector." p. 4445.
- [7] A. R. Ramezani, and A. Ghafourian, "Sprays Angle Variation of Liquid-Liquid Swirl Coaxial Injectors." p. 3747.
- [8] F. Ommi, K. Nekofar, A. Kargar et al., "Experimental investigation of characteristics of a double-base swirl injector in a liquid rocket propellant engine," Thermal Science, vol. 14, no. 2, pp. 479-491, 2010.



COPYRIGHTS

© 2022 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

- [9] M. Popp, J. Hulka, V. Yang et al., "Liquid Rocket Thrust Chambers: Aspects of Modeling, Analysis, and Design," American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [10] S. Seo, Y.M. Han, and H.S. Choi, "Combustion characteristics of bi-liquid swirl coaxial injectors with respect to a recess," Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, vol. 53, no. 179, pp. 24-31, 2010.

[۱۱] م. پناهی‌بخش، ح. کریمی مزرعه‌شاهی، ح. خسروبیگی و همکاران، "بررسی روش‌های طراحی انژکتورهای پیچشی و طراحی یک نمونه انژکتور پیچشی هم‌محور دوگانه"، کنفرانس ملی مهندسی مکانیک ایران، شیراز، دانشگاه