

بررسی تجربی و تحلیلی مشخصه‌های عملکردی انژکتور فشاری-پیچشی دوگانه

نوذر اکبری*

استادیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

چکیده

تحقیق انجام شده شامل مطالعه رفتار پاشش و شناخت بهتر انژکتور فشاری پیچشی دوگانه جهت بهبود طراحی‌های آتی آن است. لذا تاثیر تعدادی از پارامترهای عملکردی به صورت تابعی از فشار، اعداد رینولدز و وبر بیان شده است. شرایط انجام تمامی آزمایش‌ها شرایط استاندارد اتمسفری می‌باشد و از آب به عنوان سیال عامل استفاده شده است. تصویربرداری از میدان پاشش با استفاده از روش عکس‌برداری سریع انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز ابتدا رژیم پاشش انژکتور از مود چکیدن به مود اتمیزاسیون تغییر یافته و با افزایش بیشتر رینولدز رژیم کاملاً توسعه یافته، حاکم می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز، زاویه پاشش برای هر دو مسیر سیال ابتدا افزایش می‌یابد و با افزایش بیشتر آن ثابت باقی می‌ماند. فشار طراحی انژکتور حدود ده بار برآورد می‌شود؛ زیرا در این فشار کمترین طول شکست به دست آمده است. اندازه‌گیری توزیع فضایی و مساحت پاشش، عملکرد انژکتور را در جهت ایجاد اسپری به صورت یک مخروط توخالی متقارن تصدیق می‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد ضریب تخلیه تنها به شکل هندسی انژکتور وابسته نیست و با افزایش عدد رینولدز تغییر می‌کند.

واژه های کلیدی: اتمیزاسیون، توزیع فضایی، دبی، زاویه پاشش، طول شکست.

Experimental and Analytical Study of Performance Characteristics of Pressure-Swirl Duplex Injector

N. Akbari

Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari Air University, Tehran, Iran

Abstract

The research carried out is a study of spray behavior and a better understanding of the Pressure-Swirl Duplex Injector to improve its future design. Therefore, the effect of a number of functional parameters is expressed as a function of pressure, Reynolds and Weber numbers. Water was the experiment fluid and all of the experiments performed at atmospheric standard condition. Spray area shooting were carried out based on fast shooting method. The results show that increasing Reynolds number would tend to change trickle mode regime to atomization then fully developed regime would be dominated as Reynolds numbers further increases. Moreover, increasing Reynolds numbers would increase spraying angle of both paths followed by maintaining at constant values. Due to Injector's design pressure is estimated equaling to 10 bars because lowest break-up angle was achieved around this condition. Furthermore, spatial distribution and spraying area measurements showed that the injector has the significant performance to creating a symmetric corn hollow spraying pattern. Additionally, it was realized that discharge coefficient is not only dependent on the geometry of the injector and would raise while Reynolds changes.

Keywords: Atomization, Spatial distribution, mass flow rate, Spray angle, break-up length.

آزمایش‌های مربوط به انژکتور در حالت کلی به سه دسته آزمایش هیدرو استاتیکی، آزمایش غیر واکنشی و آزمایش واکنشی تقسیم می‌شود. آزمایش‌های غیر واکنشی و واکنشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. آزمایش‌های غیر واکنشی برای ارزیابی مشخصات طراحی که شامل اختلاف فشار مؤثر انژکتور (تفاضل فشار ورودی به انژکتور به خروجی از آن)، تصحیح الگوی پاشش و بهبود کیفیت اتمیزاسیون استفاده می‌شود [۲]. در آزمایش‌های غیر واکنشی دبی جرمی واقعی انژکتور تعیین می‌شود. در این نوع آزمایش معمولاً از آب به عنوان سیال عامل استفاده می‌شود؛ زیرا علاوه بر بی‌خطر و در دسترس بودن دارای چگالی و لزجت تقریباً یکسانی با اکسیژن مایع می‌باشد اما در مقابل کشش سطحی آب بسیار بیشتر از اکسیژن مایع است. در نتیجه مرتبه گروه‌های بی‌بعدي مانند عدد وبر و رینولدز برای شرایط کاری تعریف می‌شود. شرایط محیطی این نوع آزمایش‌ها، اغلب شرایط اتمسفری است و شرایط عملکردی نیز با تغییر پارامترهایی مانند فشار پشت انژکتور، دبی جریان عبوری از انژکتور سیال عامل، تغییر می‌کنند. عوامل اصلی پیشرفت سامانه پاشش سوخت در محفظه احتراق شامل، بهبود در مصرف سوخت، افزایش بازده احتراق و کاهش

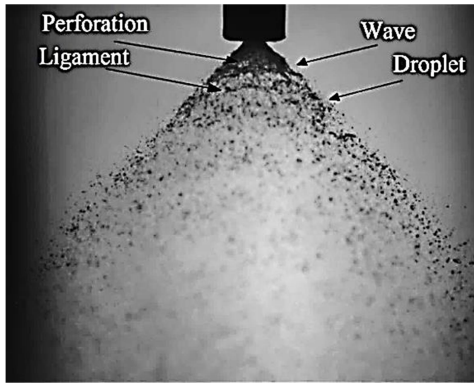
۱- مقدمه

انژکتور و سامانه پاشش از مهمترین بخش‌ها در روند طراحی و توسعه اجزای یک موتور سوخت مایع هستند. پاشش سوخت، فرآیندی مهم در تعیین عملکرد محفظه احتراق موتور هواپیما می‌باشد. کیفیت پاشش در توربین‌های گاز هوایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کیفیت بهتر پاشش در محفظه احتراق، تضمینی بر تبخیر سریع‌تر سوخت و اختلاط بهتر سوخت و هوا خواهد بود. کیفیت اسپری بر روی محدوده پایداری، بازده احتراق و انتشار آلاینده‌ها تأثیر مستقیم دارد [۱]. به دلیل عدم وجود نظریه‌های قطعی و فقدان شناخت کافی از پدیده پاشش و اتمیزاسیون، بررسی‌های تجربی و انجام آزمایش به منظور شناخت کامل پدیده پاشش و تأثیر پارامترهای هندسی و عملکردی، کاملاً ضروری است. به ویژه اگر این مطالعات بر روی نمونه‌های صنعتی و در حال استفاده باشد که علاوه بر مشاهده رفتار دقیق‌تر پدیده با بهینه کردن طرح و ایده‌های طراحی داخلی نیز همراه خواهد بود.

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: nozar@ssau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۰۷

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۲/۰۲



شکل ۱- روند فروپاشی توده سیال

همچنین دارفینر [۷] تأثیر لزجت در انژکتورهای پیچشی را مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفته که افزایش لزجت، باعث افزایش اندازه قطرات می‌شود. از بین محققین مثل جونز [۸] تأثیر قطر نازل بر روی نفوذ را مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که با افزایش قطر نازل، نفوذ افزایش می‌یابد؛ زیرا قطر قطرات زیاد شده و قطرات بزرگ‌تر دارای انرژی جنبشی بیشتری هستند. ریتز و بوکو [۹] روی طراحی بهینه نازل تحقیقاتی انجام داده و پارامترهای مؤثر بر کیفیت بهتر افشانه را مورد بررسی قرار داده‌اند. یول و همکارانش [۱۰] تأثیر پارامترهای هندسی انژکتور پیچشی بر عملکرد آن را با استفاده از تحلیل دینامیکی ذرات مورد بررسی قرار داده‌اند. راماموتی و همکاران [۱۱] دو نوع انژکتور پیچشی سیلندری را مورد بررسی قرار داده که هدف آنها مقایسه دو نوع انژکتور پیچشی مارپیچ و انژکتور پیچشی محوری از نظر افت فشار در هریک از آنها بوده است. وینی و لیفی بور [۱۲] کارهای زیادی به صورت تجربی انجام داده‌اند، که عمدتاً ارتباط قطر متوسط قطرات با افت فشار و خواص سیال را بررسی کرده‌اند. در تحقیقات و بررسی‌های انجام شده فوق عمدتاً به بررسی مکانیزم تأثیر فشار، خواص سیال، شرایط محلی، تغییر قطر نازل و غیره بر مشخصات پاشش پرداخته شده است. در جدیدترین تحقیقات آپت و همکاران [۱۳] فرآیند اتمیزاسیون افشانه را در یک انژکتور پیچشی با استفاده از مدل تصادفی و شبیه‌سازی گردابه بزرگ مدل‌سازی عددی نموده‌اند. یونجائه چانگ و همکاران [۱۴] اثر تغییر قطر و طول محفظه چرخش انژکتور پیچشی را بر مشخصه‌های دینامیکی آن به صورت تجربی مورد مطالعه قرار داده‌اند. ژانگ هی کیانگ و همکاران [۱۵] 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 گرادیان 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. مین ووک لی و همکاران [۱۶] مدل شکست قطرات را در جریان‌های پاششی رقیق به صورت تحلیلی مقایسه و تصحیح نموده‌اند و خطاهای آن‌ها را مشخص نموده‌اند. خوخو و لئوچینگ [۱۷] شکست ثانویه قطرات مایع را در یک جریان گاز، با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی مستقیم مدل‌سازی نموده‌اند. آن‌ها از الگوریتم SIMPLE برای حل معادلات ناویر-استوکس دوبعدی ناپایا برای قطره و جریان گاز محیط استفاده نموده‌اند.

آلاینده‌ها (از جمله هیدروکربن‌های نسوخته، دوده و منو کسید کربن) است [۳]. انژکتورهای فشاری-پیچشی از قابل‌اعتمادترین انژکتورها در قدرت پودر شونده‌گی سوخت در محفظه‌های احتراق هستند. انژکتورهای فشاری-پیچشی به‌طور گسترده در محفظه‌های احتراق موتور هواپیما استفاده می‌شوند. این نوع انژکتورها در موتورهای توربین گاز، دیگ‌های صنعتی، موتورهای موشک سوخت مایع و صنایع کشاورزی کاربرد فراوان دارند [۴]. از ویژگی‌های اصلی انژکتورهای فشاری- پیچشی، به دلیل ایجاد ورق‌های نازک سوخت، باعث ایجاد قطرات با قطر کوچک و زاویه پاشش گسترده در موتورهای هواپیما می‌شوند. در انژکتورهای فشاری-پیچشی سیال تحت‌فشار از طریق سوراخ‌های مماسی وارد محفظه چرخش می‌شود. با چرخش سریع سیال درون محفظه، ناحیه‌ای کم‌فشار را در مرکز محفظه چرخش ایجاد کرده که باعث ایجاد ستون هوایی تا بیرون از انژکتور می‌شود؛ به همین دلیل جریان خروجی از روزنه به‌صورت فیلم خارج شده و پاشش به‌صورت مخروطی توخالی دیده می‌شود [۵]. اصل اساسی در فروپاشی مایع، تعادل بین نیروهای برهم زننده و انسجام دهنده است. نیروهای برهم زننده شامل، انرژی جنبشی، نوسانات فشار، نیروی برشی سیال، اصطکاک و گرانش است. نیروهای منسجم کننده درون سیال شامل، لزجت و کشش سطحی است. اسپری مایع شامل فرآیندهای پیچیده فیزیکی می‌باشد. سه رژیم جریان موجود در انژکتور شامل جریان داخلی، شکست اولیه و پراکندگی قطرات می‌باشد. فیلم خروجی مایع به خاطر نیروهای آئرو دینامیکی محیط ناپایدار شده و باعث رشد امواج^۱ و ایجاد حفره^۲ بر روی سطح فیلم می‌شود. همه این عوامل سبب می‌شود تا فیلم مایع شکسته شده و به رشته‌های سیال^۳ و در نهایت به قطره^۴ تبدیل شود. در شکل ۱ روند فروپاشی توده سیال مشخص شده است. بسته به شرایط گاز محیط، قطرات سوخت در طول حرکت با کاهش سرعت، افزایش برخورد، تبخیر و فروپاشی ثانویه مواجه می‌شوند. برای سامانه احتراق مهم‌ترین موضوع تبخیر قطرات سوخت است.

از ویژگی‌های پاشش که به‌منظور ارزیابی و عملکرد سامانه پاشش مورد بررسی قرار می‌گیرد شامل دبی، ضریب تخلیه، زاویه پاشش، طول شکست صفحه، توزیع فضایی پاشش و قطر قطرات است. در ادامه چند نمونه از جدیدترین تحقیقات تجربی که در زمینه انژکتور پیچشی انجام شده است، ارائه شده است.

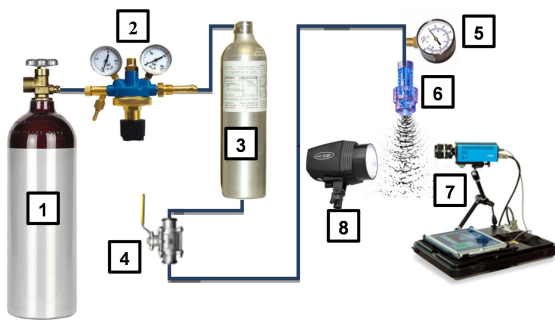
مطالعات روی انواع اتمایزر به‌خصوص اتمایزرهای پیچشی انجام گرفته که می‌توان به مطالعات ژائو، لی و چاین [۶] به صورت تجربی و تحلیلی بر روی دینامیک قطرات با استفاده روش تحلیلی دینامیک ذرات اشاره نمود.

- 1 Wave
- 2 Perforation
- 3 Ligament
- 4 Droplet

تنظیم می‌شود. با باز شدن شیر دستی ۴، آب از لوله واسط عبور کرده و از طریق انژکتور ۶ خارج می‌شود. فشار آب در لوله درست قبل از انژکتور توسط فشارسنج ۵ خوانده می‌شود. تصویر اسپری حاصله توسط دوربین ۷ با استفاده از نور پشتی که توسط منبع ۸ تأمین می‌شود، ثبت می‌گردد. جهت تعیین تأثیر فشار بر مشخصه‌های عملکردی انژکتور، گستره فشارهای نسبی بین ۰ تا ۲۰ بار در محیط اتمسفری انجام شده‌اند. برای به حداقل رساندن خطای اندازه‌گیری، هر آزمایش چندین مرتبه تکرار شده است.

۳-۲- روش عکس‌برداری و نوردهی

برای مطالعه ساختار ظاهری اسپری با استفاده از دوربین سرعت‌بالا با سرعت عکس‌برداری کوتاه‌مدت (در حدود ۱۰ تا ۲۰ میکروثانیه) استفاده شده است. برای اندازه‌گیری اپتیکی از روش نوردهی پس‌زمینه^۱ استفاده شده است. در این روش نور از جلوی دوربین تابیده می‌شود و مانع شفاف بین منبع نور و انژکتور قرار دارد. عموماً روش پس‌زمینه برای محیط شفاف (مانند آب‌وهوا) مناسب است. در روش پس‌زمینه معمولاً از فلش لامپ، تولید جرقه، نورهای ال ای دی و یا لیزر به‌عنوان منبع نور استفاده می‌شود. در این آزمایش از نورافکن ۱۰۰۰ وات به‌عنوان منبع نور استفاده شده است.



شکل ۲- طرحواره چیدمان آزمایش

۴-۲- مشخصات سیال و شرایط آزمایش

از آب به‌عنوان سیال عامل استفاده می‌شود. در جدول ۱ مشخصات و شرایط آزمایش بر روی سیال مشخص شده است.

۳- نحوه محاسبه نتایج

دبی خروجی از انژکتور، با اندازه‌گیری دبی در فشارهای مختلف در مدت‌زمان مشخص به دست می‌آید. زاویه پاشش و طول شکست از پردازش تصاویر برای هر فشار استخراج شده است. تمامی آزمایش‌ها در شرایط اتمسفری انجام شده است و برای به حداقل رساندن خطای اندازه‌گیری، هر آزمایش چندین مرتبه تکرار شده است. برای محاسبه زاویه پاشش با رسم خطوط در مرز سیال، زاویه بازشدگی پاشش به‌دست آمده است. زوایای به‌دست‌آمده مربوط به نیم مخروط پاشش می‌باشند. برای دقت اندازه‌گیری زاویه پاشش، لازم است تا چندین

در این پژوهش برای مطالعه تجربی و تحلیلی جریان پاشش، از یک انژکتور فشاری-پیچشی دوگانه صنعتی استفاده شده است. انژکتور مورد مطالعه در توربین گاز هوایی J85_21 به‌کاربرده می‌شود. به علت نبود اطلاعاتی در مورد نحوه عملکرد این انژکتور با بررسی تجربی مورد آزمایش قرار گرفت. پارامترهای مورد مطالعه شامل دبی انژکتور، ضریب تخلیه، طول شکست، زاویه مخروطی، الگوی فضایی، مساحت پاشش و قطر قطرات است و تغییرات آن‌ها به‌صورت تابعی از فشار، اعداد رینولدز و وبر انژکتور بیان شده است. اهمیت ویژه این موضوع علاوه بر مطالعه رفتار پاشش، شناخت بهتر این دسته از انژکتورها جهت بهبود طراحی‌های آبی داخلی می‌باشد. تعداد طبقات توربین این موتور دو و تعداد طبقات کمپرسور آن نه عدد است. محفظه احتراق این موتور از نوع حلقوی است. فشار محفظه احتراق این موتور در شرایط نامی در حدود صد و چهل و پنج psi می‌باشد. تعداد انژکتورهای درون محفظه احتراق دوازده عدد می‌باشد [۱۸].

نوآوری انجام شده در این تحقیق عبارت است از

- ۱- برای اولین بار در کشور یک انژکتور فشاری پیچشی دوگانه که در محفظه احتراق موتور توربین گاز هوایی J85-21 استفاده شده، مورد بررسی و تحقیق علمی قرار گرفته شده است، تا از نتایج بدست آمده فرایند طراحی و ساخت آن تکمیل گردد. لازم به ذکر است که این انژکتور از نوع مدرن‌ترین انژکتورهای استفاده شده در موتورهای توربین گازی می‌باشد.
- ۲- بررسی اثرات عدد رینولدز بر ضریب تخلیه جت و زاویه پاشش این انژکتور که برای اولین بار در این انژکتور انجام گرفته شده است.
- ۳- بررسی تاثیر شرایط فشار محیطی بر قطر قطرات تولیدی
- ۴- انجام عکس‌برداری با سرعت بالا برای تعیین مشخصات عملکردی این انژکتور

۲- معرفی مجموعه آزمایشگاهی

در این بخش به معرفی ستاپ آزمایش، روش و شرایط انجام آزمایش، روش عکس‌برداری و نوردهی و مشخصات سیال پرداخته خواهد شد.

۲-۱- دستگاه آزمایش

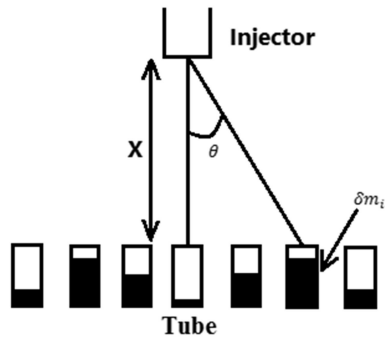
سیستم مورد آزمایش شامل:

۱. کپسول گاز نیتروژن که تحمل فشار تا ۱۵۰ بار را دارد.
۲. رگلاتور که تا فشار ۵۰ بار قابلیت تنظیم دارد
۳. مخزن سیال تحت فشار که تا فشار ۱۰۰ بار را تحمل می‌کند
۴. شیر تخلیه
۵. فشارسنج که تا ۱۰۰ بار را نشان می‌دهد
۶. انژکتور
۷. دوربین سرعت‌بالا
۸. منبع نور می‌باشد که مطابق شکل ۲ معرفی شده است.

۲-۲- روش انجام آزمایش

ابتدا مخزن ۳ از آب پر شده و تحت فشار گاز نیتروژن قرار داده می‌شود. فشار گاز از طریق رگلاتور ۲ نصب‌شده در خروجی سیلندر ۱

1 Back light



شکل ۴- نحوه اندازه‌گیری توزیع فضایی پاشش

۴- عملکرد انژکتور

این نوع انژکتور در توربین‌های گاز هوایی و زمینی بسیار پرکاربرد است. انژکتور موردبررسی در این پژوهش از نوع فشاری-پیچشی دوگانه تک ورودی است که در شکل ۵ مشخص شده است. این نوع انژکتورها توسط دو مسیر تغذیه، کنترل می‌شوند. عملکرد این نوع انژکتورها در گستره وسیعی از تغییرات جریان است. در این انژکتور در حقیقت دو انژکتور فشاری-پیچشی به صورت موازی به هم متصل شده‌اند و کاملاً از هم مستقل هستند.

طرز کار این نوع انژکتور بدین صورت است که جریان سوخت به دو مسیر جداگانه تقسیم می‌شود؛ جریان سوخت اولیه (جریان سوخت با فشار کم‌تر) و جریان سوخت ثانویه (جریان سوخت با فشار بیشتر). در شکل ۶ طرحواره از اجزا و مسیرهای اولیه و ثانویه انژکتور مشخص شده است. جریان سوخت کم‌فشار در مسیر اولیه جریان می‌یابد و با بالا رفتن فشار پشت سوخت از یک مقدار مشخص (که در آزمایش‌ها در حدود هشت و نیم بار به‌دست آمده است) مسیر جریان سوخت ثانویه توسط سوپاپ کنترل فشار باز می‌شود؛ و سوخت در مسیر ثانویه نیز جریان می‌یابد.

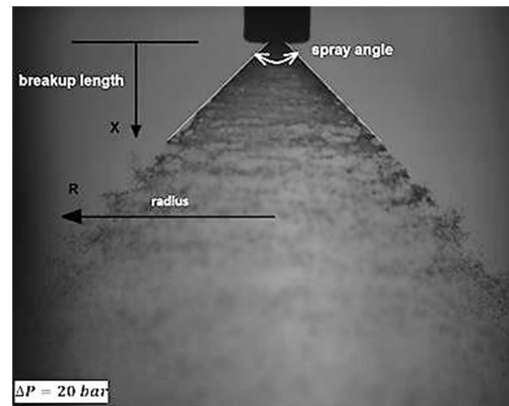


شکل ۵- انژکتور فشاری-پیچشی دوگانه مورد آزمایش

عکس از یک شرایط کاری را روی هم انداخت، سپس زاویه دامن سنجیده شود. یکی دیگر از پارامترهای اصلی در طراحی محفظه احتراق، طول شکست است. سیال خروجی از انژکتور بلافاصله پس از خروج شکسته نمی‌شود. طول بخشی از افشانه که هنوز شکسته نشده به طول فروپاشی^۱ شناخته می‌شود. توزیع مکانی پاشش، یا همان مساحت پاشش میزان بازشدگی الگوی پاشش در فواصل مشخص از انژکتور می‌باشد. مساحت پاشش در فواصل و فشارهای مختلف برای انژکتور مورد مطالعه به‌دست آمده است. نحوه به دست آوردن زاویه پاشش، طول شکست و شعاع الگوی پاشش در شکل ۳ نشان داده شده است. توزیع فضایی پاشش، شکل حجمی الگوی اسپری خروجی از انژکتور می‌باشد. طرحواره نحوه اندازه‌گیری توزیع فضایی پاشش در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات شرایط آزمایش و سیال

مقدار	شرایط آزمایش
21	دمای محیط (°C)
18	دمای آب (°C)
1000	چگالی آب (kg/m ³)
10 ⁻⁶	لزجت سینماتیکی آب (m ² /s)
73 × 10 ⁻³	کشش سطحی آب (N/m)
1.002 × 10 ⁻³	لزجت دینامیکی آب (N.s / m ²)



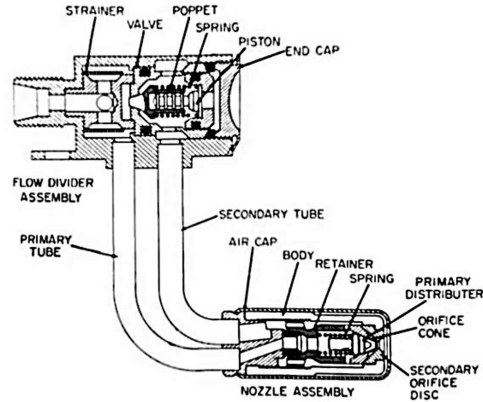
شکل ۳- نحوه اندازه‌گیری زاویه پاشش، طول شکست و مساحت پاشش

1 Breakup length

۱× نیاز می‌باشد. (تعریف رینولدز بر حسب قطر سوراخ انژکتور) و از عدد

رینولدز $10^4 \times 1/3$ تقریباً می‌توان گفت که جریان برای سیال مسیر اولیه کاملاً توسعه یافته می‌شود.

بدین معنی که زاویه پاشش تا قبل از باز شدن مسیر ثانویه ثابت باقی می‌ماند و تابع عدد رینولدز نیست. با باز شدن مسیر ثانویه زاویه پاشش و مقدار دبی خروجی افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر فشار و باز شدن کامل مسیر ثانویه جریان دوباره به حالت کاملاً توسعه یافته می‌رسد و از عدد رینولدز $10^4 \times 3$ و بعد زاویه پاشش دوباره ثابت باقی می‌ماند.



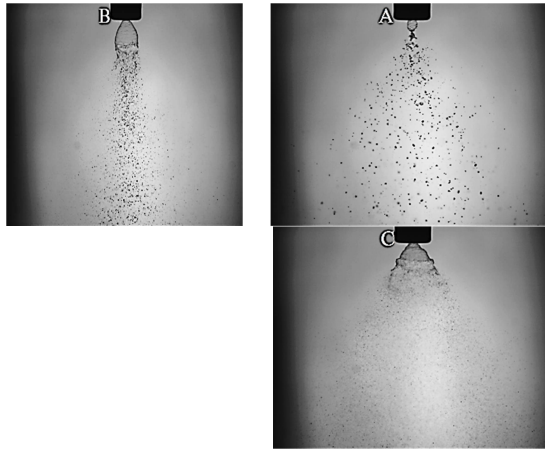
شکل ۶ طرحواره مسیر اولیه، ثانویه و اجزای داخل انژکتور [۱۸]

این دو جریان مستقل از هم بوده و با فشارهای متفاوت و در محفظه چرخش متفاوت و با روزه خروجی مستقل به محیط بیرون اسپری می‌شوند و در خروج این دو جت با الگوی پاشش متفاوت بعد از طی مسیر کوتاهی از روزه خروجی به هم برخورد می‌کنند. قطر روزه مسیر اول (d01) ۰/۷ میلی‌متر و قطر روزه مسیر ثانویه (d02) ۰/۸ میلی‌متر است.

مزیت اصلی این نوع انژکتورها، قدرت تمییزه کردن و الگوی پاشش خوب در تمام محدوده‌های فشار سوخت است. هدف اصلی طراحی با فشار متفاوت و ایجاد مسیر ثانویه قدرت پودرشدگی بالا در فشارهای کم است. چراکه با باز شدن بیش از اندازه زاویه پاشش سوخت به دیواره محفظه احتراق برخورد کرده و علاوه بر هدر رفتن سوخت، موجب افزایش هیدروکربنهای نسوخته، ایجاد دوده و کاهش بازده موتور می‌شود. با باز شدن مسیر سوخت ثانویه، میزان دبی خروجی با شیب زیادی افزایش می‌یابد. روی بدنه انژکتور تعدادی سوراخ در نزدیکی ورودی به منظور ورود هوا به صورت چرخشی برای اختلاط بهتر سوخت و هوا برای آماده‌سازی جریان برای احتراق، کنترل زاویه پاشش، ریزتر شدن قطرات سوخت و اختلاط بیشتر سوخت و هوا، خنک کاری و همچنین جهت جلوگیری از تشکیل کربن و دوده بر روی نازل خروجی تعبیه شده است.

۵- نتایج و بحث

همان‌طور که در منابع مختلف نیز عنوان شده است [۱۹]، مودهای مختلفی از شکست صفحه مایع با توجه به اختلاف فشار رخ می‌دهد. این مودها به نام‌های چکیدن، پیازی، لاله‌گون و اتمیزاسیون معروف هستند. مود چکیدن در فشارهای کم رخ می‌دهد و مایع به صورت قطره از سوراخ روزه خارج می‌شود. با افزایش افت فشار صفحه مایع شکل گرفته و حالت مخروطی پیدا می‌کند؛ اما این مخروط کمی پایین‌تر جمع شده و شکلی همانند یک پیاز را به وجود می‌آورد. در این آزمایش نیز این مودها در افت فشارهای مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج آزمایش این انژکتور نشان می‌دهد که برای تبدیل از مود لاله‌گون به مود اتمیزاسیون عدد رینولدزی برابر با 10^4



شکل ۷- مودهای مختلف شکست صفحه مایع؛ A: پیازی، B: لاله‌گون، C: اتمیزاسیون

۵-۱- اندازه‌گیری دبی

در شکل ۸ دبی خروجی از انژکتور در فشارهای مختلف نشان داده شده است. برای دقت آزمایش هر فشار دو بار، برای مدت‌زمان ۶۰ ثانیه اندازه‌گیری شده است. در این آزمایش با افزایش فشار، دبی نیز افزایش یافته است. این افزایش در فشارهای کم با نرخ کم‌تری مشاهده می‌شود. در فشارهای بیشتر از ۱۰ بار افزایش دبی با شیب بسیار زیادی مشاهده می‌شود که علت آن افزایش سطح گذر مایع است. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد افزایش دبی برای کنترل زاویه پاشش انژکتور برای فشارهای بالای ۱۰ بار می‌باشد. همان‌طور که در رابطه (۱) مشاهده می‌شود با افزایش اختلاف فشار، دبی افزایش می‌یابد.

انژکتور مورد استفاده در این تحقیق یک انژکتور نظامی بوده و در موتور J85-21 که موتور هواپیمای F5 می‌باشد مورد استفاده قرار گرفته شده است. اطلاعات تجربی در رابطه با آن در مجلات معتبر داخلی و خارجی یافت نمی‌شود و فقط می‌توان از اطلاعاتی که خود کارخانه سازنده موتور ارائه نموده استفاده کرد، که بصورت خیلی محدود در کتابهای دستورات فنی موتور J85 [۲۰] اشاره شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است نتایج تجربی بدست آورده شده با داده‌های موجود در کتاب فنی J85 مطابقت کامل دارد.

$$We = \frac{U^2 d_0 \rho_l}{\sigma} \quad (3)$$

$$U = k_v \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_l}} \quad (4)$$

$$k_v = \max \left[0.7, \frac{4\dot{m}}{\pi d_0^2 \rho_l \cos\theta} \sqrt{\frac{\rho_l}{2\Delta P}} \right] \quad (5)$$

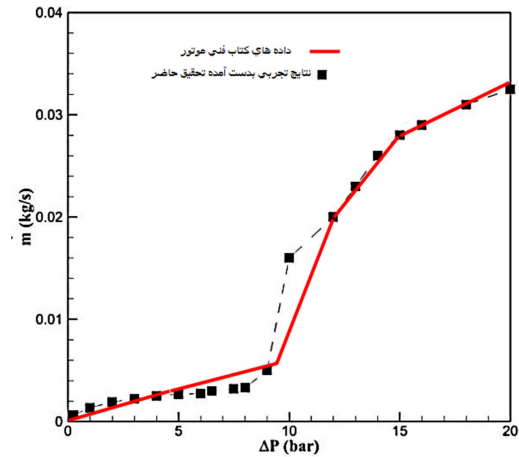
k_v ضریب سرعت و θ نیم زاویه مخروط می‌باشد.

با باز شدن مسیر ثانویه و افزایش عدد رینولدز ضریب تخلیه افزایش پیدا کرده و بعد ثابت باقی می‌ماند. برای مسیر اولیه ضریب تخلیه به 0.12 و برای مسیر ثانویه ضریب تخلیه به 0.18 می‌رسد. در این آزمایش‌ها با اندازه‌گیری اختلاف فشار انژکتور و دبی متناظر با آن، میزان ضریب تخلیه با استفاده از رابطه (۱) برای هر میزان از افت فشار تعیین می‌گردد. اعداد بدون بعد رینولدز و وبر از روابط (۲) و (۳) به دست می‌آیند. d_0 قطر سوراخ روزنه، ρ چگالی سیال، U سرعت فیلم خروج از روزنه، A_0 مساحت سوراخ روزنه، μ لزجت دینامیکی سیال، σ کشش سطحی سیال، \dot{m} دبی جرمی، ΔP اختلاف فشار می‌باشد. برای محاسبه سرعت فیلم خروج از روزنه از رابطه تحلیلی (۴) و (۵) استفاده می‌شود [۲۶].

۵-۳- اندازه‌گیری طول شکست و زاویه پاشش

زاویه پاشش در سامانه‌های احتراقی به‌ویژه در محفظه احتراق دارای اهمیت ویژه‌ای است. این پارامتر تأثیر زیادی بر عملکرد اشتعال، محدوده و انتشار هیدروکربن‌های سوخته نشده و دود دارد. در محفظه احتراق توربین گاز هوایی، اثر زاویه اسپری بر عملکرد سیستم جرقه‌زنی بسیار پراهمیت است. در موتورهای کوچک طول فروپاشی تأثیر زیادی بر توزیع فضایی دارد. نفوذ بیش‌ازاندازه اسپری، منجر به برخورد سوخت بر روی دیواره محفظه شده که باعث اتلاف سوخت خواهد شد.

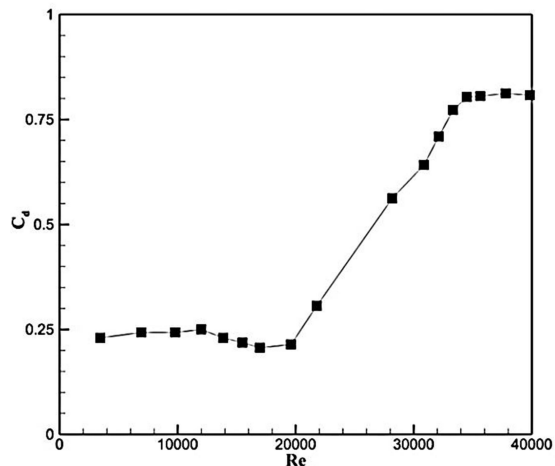
تغییرات رینولدز، Re ، باعث تغییر زاویه پاشش (θ) می‌شود. در ابتدا افزایش رینولدز باعث افزایش زاویه پاشش می‌گردد اما با افزایش بیشتر رینولدز، زمانی که مخروط کامل شکل می‌گیرد، زاویه پاشش دیگر افزایش نمی‌یابد و ثابت می‌ماند. شکل ۱۰ تغییرات زاویه پاشش برحسب عدد رینولدز را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد وقتی جریان مسیر اول توسعه‌یافته می‌شود (مخروط کامل شکل می‌گیرد) زاویه پاشش ثابت باقی می‌ماند. با باز شدن مسیر ثانویه، زاویه پاشش در حال افزایش بوده و با باز شدن کامل مسیر ثانویه، جریان سیال توسعه‌یافته شده و زاویه پاشش تغییری نمی‌کند. برای رینولدز 10^4 تا 2×10^4 برای مسیر اولیه و با باز شدن مسیر ثانویه از رینولدز 10^4 تا 3×10^4 برای مسیر ثانویه زاویه پاشش دو جت ثابت باقی مانده است.



شکل ۸- دبی انژکتور بر حسب اختلاف فشار در انژکتور

۵-۲- اندازه‌گیری ضریب تخلیه

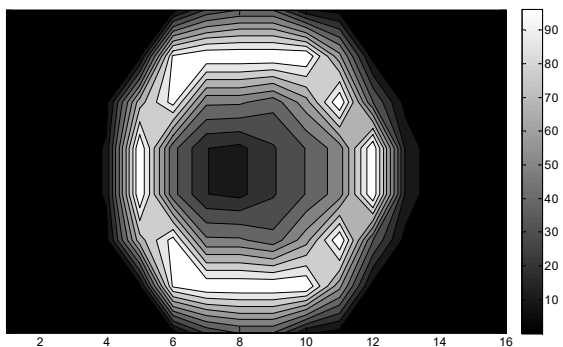
پارامتر مهمی که دبی انژکتور به آن وابستگی دارد، ضریب تخلیه انژکتور می‌باشد که نسبت واقعی به نظری دبی را بیان می‌کند. این ضریب اساساً به شکل انژکتور وابسته است [۲۱] [۲۲] [۲۳]. اما برخی از تحقیقات تجربی نشان می‌دهد که افت فشار انژکتور نیز بر روی ضریب تخلیه تأثیر می‌گذارد [۲۴] [۲۵]. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که ضریب تخلیه انژکتور با افت فشار تغییر می‌کند به نحوی که با افزایش اختلاف فشار ضریب تخلیه افزایش می‌یابد و با افزایش بیشتر اختلاف فشار ضریب تخلیه کاهش‌یافته و بعد از مقداری کاهش ثابت می‌ماند. در شکل ۹ تغییرات ضریب تخلیه نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز ضریب تخلیه برای مسیر اولیه بعد از کمی افزایش، کاهش پیدا کرده و سپس ثابت باقی می‌ماند.



شکل ۹ ضریب تخلیه انژکتور بر حسب عدد رینولدز

$$C_d = \frac{\dot{m}}{A_0 \sqrt{\rho_l \Delta P}} \quad (1)$$

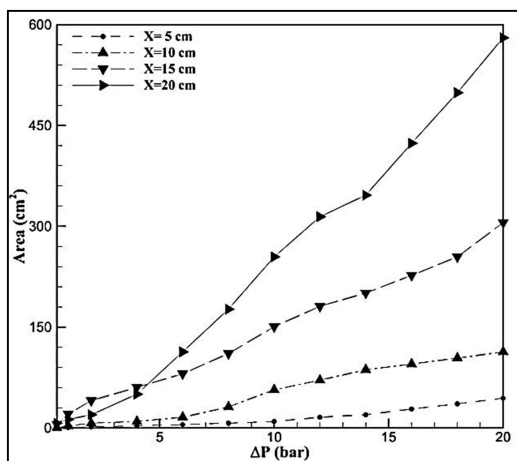
$$Re = \frac{U d_0 \rho_l}{\mu} \quad (2)$$



شکل ۱۲- درصد توزیع فضایی پاشش

۵-۵- اندازه گیری مساحت پاشش

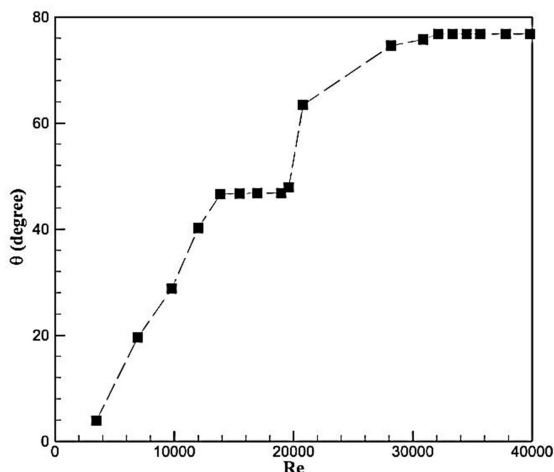
توزیع مساحت پاشش با استفاده از اندازه گیری شعاع پاشش در فواصل مختلف از روزنه خروجی (فاصله X) برای فشارهای مختلف اندازه گیری شده است. در شکل ۴ نحوه اندازه گیری را در عکس گرفته شده بطور واضح نشان میدهد. مساحت پاشش در فواصل ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتیمتری از صفحه روزنه در فشارهای مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که شکل نشان می دهد با افزایش فاصله، مساحت پاشش افزایش قابل توجهی یافته است.



شکل ۱۳- مساحت پاشش در فواصل مختلف از انژکتور

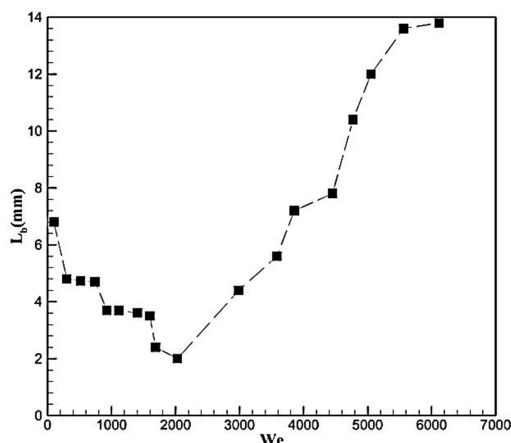
۵-۶- تعیین قطر قطرات

یکی از پارامترهای مهم در اسپری، تعیین قطر قطرات می باشد. قطر قطرات اثر بسیار قابل توجهی بر پیش بینی طول نفوذ مایع در محفظه احتراق دارد. قطر قطرات تأثیر مستقیم بر روی بازده احتراق و کنترل شکل گیری آلاینده ها را دارد. میانگین قطر قطرات به صورت تحلیلی [۱۹] با استفاده از داده های تجربی به دست آمده است. برای محاسبه میانگین قطر، ابتدا عدد جریان از رابطه (۶) به دست آمده و نسبت عدد جریان ثانویه به اولیه (R) از رابطه (۷) به دست می آید. اختلاف فشار معادل ترکیب شدن دو جت خروجی از روزنه (ΔP_e) از رابطه (۸) محاسبه می شود. میانگین قطر قطرات (SMD) از رابطه (۹) به دست می آید. قطر قطرات برای ۳ حالت: شرایط آزمایشگاه، موتور در



شکل ۱۰- نیم زاویه مخروط بر حسب عدد رینولدز

در شکل ۱۱ طول شکست بر حسب عدد وبر نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد ابتدا افزایش عدد وبر، باعث کاهش طول شکست می شود. در وبر ۲۰۰۰ (معادل فشار ۱۰ بار) کمترین طول شکست مشاهده شد. فشار کاری انژکتور احتمالاً حدود ده بار است؛ زیرا کمترین طول شکست در این فشار ثبت شده است. با باز شدن هرچه بیشتر مسیر ثانویه و اختلاط دو جت طول شکست با شیب زیادی در حال افزایش است؛ زیرا فشار از نقطه طراحی در حال دور شدن است.



شکل ۱۱- طول شکست صفحه سیال بر حسب عدد وبر

۵-۴- اندازه گیری توزیع فضایی پاشش

درصد توزیع فضایی پاشش در فشار ۱۰ بار در فاصله ۱۵ سانتیمتری از انژکتور در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد پاشش در مرکز توزیع فضایی رخ نداده است و الگوی پاشش به صورت یک مخروط متقارن توخالی نشان داده شده است.

انژکتور، دبی عبوری از انژکتور، ضریب تخلیه، توزیع فضایی و توزیع مکانی پاشش بودند. زاویه پاشش و طول شکست نیز مشخصاتی بودند که با استفاده از پارامترهای اندازه‌گیری شده و با استفاده از پردازش تصویر مورد بررسی قرار گرفتند. با استفاده از روابط تحلیلی، میانگین قطر قطرات به دست آمد.

موارد ذیل از جمله نتایج حاصله است

- با افزایش فشار افزایش دبی را خواهیم داشت که در فشارهای بالا تغییرات نامحسوس است. در فشارهای کمتر از ده بار نرخ دبی جرمی با شیب کمی در حال افزایش و در فشارهای بالای ده بار، شیب افزایش فشار خیلی زیاد می‌شود که علت این موضوع هم فعال شدن مسیر ثانویه است. این اختلاف رفتار برای زاویه پاشش هم مشاهده می‌شود.
- ضریب تخلیه تنها به شکل هندسی انژکتور وابسته نیست و با افزایش رینولدز ابتدا افزایش یافته و سپس ثابت باقی می‌ماند. ضریب تخلیه برای مسیر اولیه حدود ۰/۲ و برای مسیر ثانویه حدود ۰/۸ به دست آمده است.
- تغییر رینولدز، Re، باعث تغییر زاویه پاشش، θ ، می‌شود. در ابتدا افزایش رینولدز باعث افزایش زاویه پاشش می‌گردد اما با افزایش بیشتر رینولدز، زمانی که مخروط کامل توسعه یافته شکل می‌گیرد، زاویه پاشش ثابت می‌ماند. برای رینولدز $10^4 \times 1/2$ تا $10^4 \times 2$ برای مسیر اولیه و از $10^4 \times 3$ برای مسیر ثانویه زاویه پاشش ثابت است.
- افزایش وبر باعث کاهش طول شکست می‌شود، اما با دور شدن از نقطه طراحی، طول شکست افزایش می‌یابد. در وبر ۲۰۰۰ کمترین طول شکست به دست آمده است.
- فشار طراحی انژکتور احتمالاً ۱۰ بار است که در این فشار کمترین طول شکست به دست آمده است.
- اندازه‌گیری توزیع فضایی پاشش، عملکرد انژکتور را در جهت ایجاد اسپری به صورت یک مخروط توخالی متقارن تصدیق می‌کند.
- با افزایش فشار، عملکرد دوگانه انژکتور در گذر از فشار ۹ بار، هم در نمودارها و هم در تصاویر گرفته شده کاملاً مشهود است.
- توزیع مکانی نشان می‌دهد که قطر بازشدگی پاشش با افزایش فاصله از صفحه روزنه در حال افزایش است و شکل مخروطی پاشش حاصل می‌شود.
- زاویه مخروط گسترده‌تر میانگین قطر قطرات را کاهش می‌دهد و همچنین با افزایش وبر قطر قطرات کاهش می‌یابد.
- از برتری‌های ویژه این انژکتور

(۱) عملکرد مناسب در گستره وسیعی از فشار به دلیل داشتن دو

مسیر جریان

(۲) جریان یکنواخت در خروجی

(۳) ثابت نگه داشتن زاویه پاشش در فشارهای بالا می‌باشد.

۷- فهرست علائم

C_d	ضریب تخلیه
d_0	قطر سوراخ روزنه (m)

حال کار روی سطح زمین و موتور در حال پرواز در ارتفاع هشت کیلومتری از سطح زمین به دست آمده است. جدول ۲ شرایط دما و فشار محفظه احتراق مشخص شده است. در شکل ۱۴ نمودار میانگین قطر قطرات بر حسب عدد وبر نشان داده شده است. با افزایش عدد وبر میانگین قطر قطرات کاهش می‌یابد. در اعداد وبر بالا تغییرات میانگین قطر نامحسوس است. کمترین میانگین قطر، برای شرایط پرواز به دست آمده است.

$$FN = \frac{\dot{m}}{\sqrt{\rho_l \Delta P}} \quad (6)$$

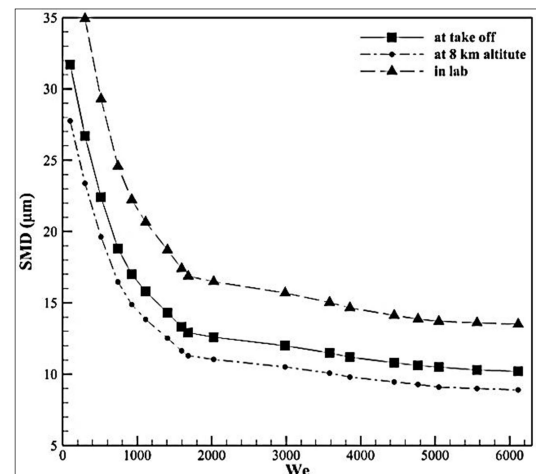
$$R = \frac{FN_{secondary}}{FN_{primary}} \quad (7)$$

$$\Delta P_e = \frac{4\Delta P}{R^2} [(1+R)^{0.5} - 1]^2 \quad (8)$$

$$SMD = 2.25 \sigma^{0.25} \mu^{0.25} \dot{m}^{0.25} \Delta P_e^{-0.5} \rho_a^{-0.25} \quad (9)$$

جدول ۲- مشخصات شرایط مختلف

حالت	دمای محفظه (K)	فشار محفظه (bar)
شرایط موتور روشن سطح زمین	۵۷۰	۳
شرایط موتور در ارتفاع ۸ کیلومتری از سطح زمین	۵۰۰	۱۰
شرایط آزمایشگاه	۲۹۰	۱۰۰/۰۰۱ (پاسکال)



شکل ۱۴- میانگین قطر قطرات بر حسب وبر در شرایط مختلف محیط

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش رفتار یک انژکتور صنعتی دوگانه توربین گاز هوایی به صورت تجربی و تحلیلی و با استفاده از روش تصویربرداری پس‌زمینه مورد بررسی قرار گرفت. بازده سوخت متأثر از نحوه پاشش سوخت است. به همین دلیل در این پژوهش شاخص‌های مختلف پاشش این نوع انژکتور در فشارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های تجربی، فشار پشت

[12] Lee E. J., Oh S. Y., Kim H. Y., James S. C., oonS. S. Y., Measuring air core characteristics of a pressure-swirl atomizer via a transparent acrylic nozzle at various Reynolds numbers, *Experimental thermal and fluid science*, Vol. 34, No. 8, pp. 1475-1483, 2010.

[13] Apte S. V., Mahesh K., Gorokhovski M., Moin P., Stochastic modeling of atomizing spray in a complex swirl injector using large eddy simulation, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32, No. 2, pp. 2257-2266, 2009.

[14] Chung Y., Khil T., Yoon J., Yoon Y., Bazarov V., Experimental Study on Simplex Swirl Injector Dynamics with Varying Geometry, *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 12, No. 1, pp. 57-62, 2011.

[15] Zhang H., Zhou L., Chan C., Numerical simulation of internal flow fields of swirl coaxial injector in a hot environment, *Journal of computational and applied mathematics*, Vol. 235, No. 13, pp. 3783-3790, 2011.

[16] Tumer M., Sazhin S., Healey J., Crua C., Martynov S., A breakup model for transient Diesel fuel sprays, *Fuel*, Vol. 97, pp. 288-305, 2012.

[17] Jing L., Xu X., Direct numerical simulation of secondary breakup of liquid drops, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 23, No. 2, pp. 153-161, 2010.

[18] Casamassa J. V., Bent R. D., *Jet aircraft power systems*: Glencoe/McGraw-Hill School Publishing Company, 1965.

[19] Lefebvre A., *Atomization and sprays*: CRC press, 1988.

[20] General Electric, Technical Manual Intermediate Maintenance Instructions Jet Engine Models GE-21, 2J-J85-96-1, 1May 1978

[21] Rizk N., Lefebvre A. H., Internal flow characteristics of simplex swirl atomizers, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 1, No. 3, pp. 193-199, 1985.

[22] Dombrowski N., Hasson D., The flow characteristics of swirl (centrifugal) spray pressure nozzles with low viscosity liquids, *AIChE Journal*, Vol. 15, No. 4, pp. 604-611, 1969.

[23] Taylor G., The boundary layer in the converging nozzle of a swirl atomizer, *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol. 3, No. 2, pp. 129-139, 1950.

[24] Jones A., Factors Affecting the Performance of Large Swirl Pressure Jet Atomizers, *CEGB Laboratory Note R/M/nl054*, 1982.

[25] Ballester J., Dopazo C., Discharge coefficient and spray angle measurements for small pressure-swirl nozzles, *Atomization and sprays*, Vol. 4, No. 3, 1994.

[26] Han Z., Parrish S., Farrell P. V., Reitz R. D., Modeling atomization processes of pressure-swirl hollow-cone fuel sprays, *Atomization and Sprays*, Vol. 7, No. 6, 1997.

عدد جریان (m^{-2})	FN
ضریب سرعت	k_v
طول شکست (m)	L_b
دبی جرمی (kgs^{-1})	\dot{m}
جرم (gr)	m_i
اختلاف فشار (bar)	ΔP
نسبت عدد جریان مسیر ثانویه به اولیه	R
عدد رینولدز	Re
میانگین قطر قطره (μm)	SMD
سرعت فیلم سیال خروجی از روزنه (ms^{-1})	U
عدد وبر	We
علایم یونانی	
نیم زاویه مخروط پاشش (درجه)	θ
لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)	μ
کشش سطحی (Nm^{-1})	σ
چگالی (kgm^{-3})	ρ
زیر نویس ها	
سیال	l
هوا	a
معادل برخورد دو جت سیال در محیط بیرون	e

۸- مراجع

[1] Rizk N., Lefebvre A., Prediction of velocity coefficient and spray cone angle for simplex swirl atomizers, *International Journal of Turbo and Jet Engines*, Vol. 4, No. 1-2, pp. 65-74, 1987.

[2] Huzel D. K., *Modern engineering for design of liquid-propellant rocket engines*: AiAA, 1992.

[3] Som S., Aggarwal S. K., Effects of primary break up modeling on spray and combustion characteristics of compression ignition engines, *Combustion and Flame*, Vol. 157, No. 6, pp. 1179-1193, 2010.

[4] Senecal P., Schmidt D. P., Nouar I., Rutland C. J., Reitz R. D., Corradini M., Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 25, No. 6, pp. 1073-1097, 1999.

[5] Ibrahim A., *Comprehensive study of internal flow field and linear and nonlinear instability of an annular liquid sheet emanating from an atomizer*, Thesis, University of Cincinnati, 2006.

[6] Zhao Y., Li W., Chin J., Experimental and analytical investigation on the variation of spray characteristics along radial distance downstream of a pressure swirl atomizer, *Journal of engineering for gas turbines and power*, Vol. 108, No. 3, pp. 473-478, 1986.

[7] Dorfner V., Domnick J., Durst F., Kohler R., Viscosity and surface tension effects in pressure swirl atomization, *Atomization and Sprays*, Vol. 5, No. 3, 1995.

[8] Bates C., Hay J., Pressure Atomizer PDA Measurement, Dantec information No.11 June, 1992.

[9] Reitz R. D., Bracco F., *On the dependence of spray angle and other spray parameters on nozzle design and operating conditions*, 0148-7191, SAE technical paper, pp. 1979.

[10] Sharief R., Jeong J., James D., The performance characteristics of solid-cone-spray pressure-swirl atomizers, *Atomization and Sprays*, Vol. 10, No. 6, 2000.

[11] Ramamurthi K., Tharakan T. J., Experimental study of liquid sheets formed in coaxial swirl injectors, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 11, No. 6, pp. 1103-1109, 1995.