

مطالعه‌ی تجربی میدان پاشش در انژکتور پیچشی

کاوه قربانیان (دانشیار)

محمدرضا سلطانی (دانشیار)

محمدرضا مراد (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

مهدی اشجعی (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

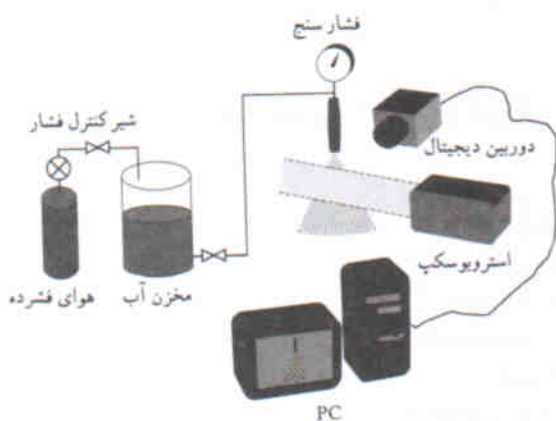
در این تحقیق از روش‌های تجربی برای بررسی شکل‌گیری پاشش، زاویه‌ی پاشش و همچنین توزیع قطر و سرعت قطرات برای فشار پاشش‌های مختلف در یک انژکتور پیچشی استفاده شده است. این بررسی‌ها عکس‌برداری از پاشش در فشارهای مختلف، اندازه‌گیری زاویه‌ی پاشش، طول شکست، اندازه‌گیری توزیع سرعت و قطر قطرات با استفاده از PDA را شامل می‌شود. اندازه‌گیری‌ها با استفاده از روش PDA در سه حالت مختلف انجام شده که طی آنها میدان پاشش و تغییرات به‌وجود آمده در توزیع سرعت، قطر قطرات در جهت محور پاشش (جهت محوری از اریفیس) و عمود بر پاشش (جهت شعاعی از اریفیس) در فشارهای پشت متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است.

مقدمه

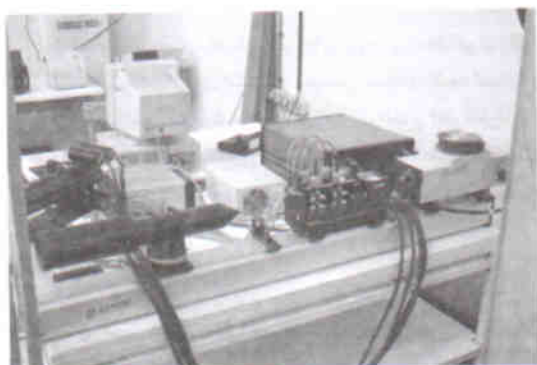
در چرخه‌ی طراحی موتور، طراحی و انتخاب انژکتورهای محافظه‌ی احتراق و چیدمانی آنها در صفحه‌ی انژکتور یکی از پیچیده‌ترین و مهم‌ترین موضوعات قابل بحث است. نوع انژکتور به کار رفته یا طراحی شده، دقت و حساسیت ساخت انژکتور و تولرانس‌های بسته به آن نیز از جمله عواملی است که بر حساسیت و اهمیت آن در مجموعه‌ی موتور می‌افزاید. آزمایشات پرهزینه‌ی برای بررسی اثر تولرانس‌های ساختی بر عملکرد محافظه‌ی احتراق انجام شده،^[۱] و هنوز هم ادامه دارد. طراحی انژکتور به نحوی که کارایی بالایی در ریزسازی سوخت، اکسید و اختلاط مناسب آنها داشته باشد، یکی از گلوگاه‌های طراحی و بهینه‌سازی موتورها است. امروزه فعالیت‌های فراوانی برای کنترل ناپایداری با استفاده از تغییر شرایط عملکردی انژکتور در شرف انجام است.

یکی از انژکتورهای بسیار رایج مورد استفاده در موتورهای انژکتور پیچشی است که دارای مشخصه‌های خوب ریزسازی است. مهم‌ترین پارامترهایی که از این نوع انژکتورها تاکنون شناسایی و مورد بررسی قرار گرفته‌اند، عبارت‌اند از: زاویه‌ی اسپری، طول نفوذ، طول شکست، توزیع جرمی و یکنواختی پاشش، نسبت اختلاط، توزیع سرعت و توزیع اندازه‌ی قطرات. مروری بر مجموعه فعالیت‌های انجام شده نشان می‌دهد که با وجود تحقیقات زیاد انجام شده در این زمینه، هنوز هم تحقیقات وسیعی در زمینه‌ی انژکتورهای پیچشی و مشخصات پاشش آنها در شرایط مختلف ادامه دارد.

قدیمی‌ترین بررسی‌های انجام شده در زمینه‌ی این نوع انژکتور، در خصوص مطالعه‌ی زاویه‌ی پاشش و ضریب تخلیه برای هندسه‌های متفاوت بوده است.^[۲] نتایج این آزمایشات منجر به برقراری رابطه‌ی بین ضریب تخلیه و زاویه‌ی پیچشی پاشش شده است. در یک بررسی که پاشش پیچشی آب در هوا را مورد توجه و بررسی قرار دادند^[۳]، از روش هولوگرافی (Holography) برای عکس‌برداری قطرات اسپری استفاده شده است که در آن بخش شکست صفحه‌ی مایع (Sheet Portion) و قطرات و حرکت آنها (Droplet Portion) مورد مطالعه قرار گرفته است. یول و همکارانش از سیستم‌های PDA^۱ و Malvern برای بررسی عملکرد فرایند پاشش در انژکتورهای پیچشی با چتر پاشش توپُر استفاده کردند که در آنها توزیع سرعت و قطر میانگین اندازه‌گیری شده است.^[۴] یک مطالعه‌ی تجربی با روش PDA روی مشخصات پاشش آب بعد از شکستن آن به قطرات ریز انجام شده که در این مطالعه قطر و سرعت قطرات آب اندازه‌گیری شده و تقارن پاشش مورد مطالعه قرار گرفته است.^[۵] نتایج این بررسی‌ها حاکی از آن است که در راستای شعاعی تقارن مطلوبی در پاشش وجود دارد. اشمیت و همکارانش در مطالعه‌ی فرایند پاشش و تشکیل قطره را در ناحیه‌ی شکست مایع پیوسته به مایع گسسته بعد از خروج آن از انژکتور پیچشی مورد بررسی قرار دادند و با بررسی‌های عددی مقایسه کردند.^[۶] پارامترهای تأثیرگذار بر زاویه‌ی اسپری برای انژکتورهای پیچشی توسط شین و همکارانش مورد بررسی و مطالعه تجربی قرار گرفته است.^[۷] زاویه‌ی اسپری با



شکل ۱. تجهیزات مورد استفاده در مطالعه‌ی تصویری.



شکل ۲. تجهیزات مورد استفاده در روش لیزری.

از نوع آرگن همگن^۲ می‌باشد. انتقال‌دهنده‌ی نور لیزر، آن را به سه رنگ مختلف با طول موج‌های مشخص تقسیم می‌کند.

این سه رنگ عبارت‌اند از:

۱. رنگ سبز با طول موج $514/5nm$ برای اندازه‌گیری سرعت محوری لاو همچنین قطر قطره؛

۲. رنگ آبی با طول موج $488nm$ برای اندازه‌گیری مؤلفه‌ی دوم سرعت در جهت شعاعی^۷؛

۳. نور بنفش با طول موج $476/5nm$ که محور نور را نشان داده و برای تنظیمات دستگاه به کار گرفته می‌شود.

نور واحد باگذر از تجزیه‌کننده‌ی نور^۳ به چهار دسته پرتو تقسیم می‌شود که این چهار شعاع نوری بعد از گذشتن از عدسی همدیگر را در یک نقطه قطع می‌کنند. در محل برخورد این چهار شعاع لیزر یک حجم تداخل بیضی‌گون خیلی کوچک تشکیل می‌شود. سیستم PDA ثابت است و آنزکتور روی یک سیستم انتقال نصب می‌شود که می‌توان آن را در سه جهت x, y, z حرکت داد و با این کار نقطه‌ی برخورد یا نقطه‌ی اندازه‌گیری را به محل مورد نظر انتقال داد.

دیگر مشخصات اپتیکی سیستم PDA، مورد استفاده در این آزمایشات، در جدول ۱ آورده شده است.

تغییر فشار پاشش مطالعه شده، و مشاهده شده است که با افزایش فشار، زاویه‌ی پاشش افزایش یافته و سپس تقریباً ثابت می‌شود. قطر متوسط قطرات در این نوع آنزکتورها مورد مطالعه‌ی تجربی قرار گرفته و قطر متوسط ساوتر برحسب تغییرات فشار پاشش و خواص سیال و همچنین هندسه‌ی نازل مطالعه شده و روابط تجربی برای آنها استخراج شده است.^[۸]

در این مقاله تقارن پاشش در آنزکتورهای پیچشی و همچنین توزیع سرعت و قطر قطرات مورد مطالعه قرار گرفته است که نتایج این بررسی‌ها حاکی از تقارن نسبتاً مطلوبی در پاشش آنزکتورهای پیچشی است. در صورت بهبود کیفیت ساخت آنزکتور این تقارن نیز بهبود می‌یابد.^[۹] همچنین در مطالعه‌ی دیگری یک مدل لاگرانژی برای حرکت قطرات بعد از شکل‌گیری آنها استخراج شد، و با در نظر گرفتن توزیع سرعت سیال خروجی، از حل معادلات بقا برای جریان داخل آنزکتور، توزیع سرعت قطرات و مسیر آنها تا مقطع مورد نظر محاسبه شد، که در نتایج تجربی با نتایج حاصل انطباق مناسبی نشان می‌دهند.^[۱۰]

با وجود بررسی‌های ذکر شده، همچنان تحقیقات وسیعی در زمینه‌های مختلف آنزکتورهای پیچشی برای بهینه‌سازی طراحی این نوع آنزکتورها و محافظه‌ی احتراقی مربوط به آنها انجام می‌گیرد. در این نوشتار اثر فشار پاشش بر زاویه‌ی پاشش، طول شکست، سرعت و قطر متوسط قطرات یک آنزکتور پیچشی تک‌نازله مورد مطالعه و بررسی تجربی واقع شده است. همچنین توزیع سرعت در فواصل مختلف محوری اندازه‌گیری شده و پدیده‌ی خودمتمشاهی برای اولین بار برای این نوع از آنزکتورها مورد بررسی قرار گرفته است.

تجهیزات آزمایش

تجهیزات به کار رفته در آزمایشات کنونی عبارت‌اند از: سیستم PDA، سیستم تغذیه‌ی سیال‌کاری، سیستم اخذ اطلاعات، دوربین دیجیتال سونی با کیفیت بالا، استروپوسکوپ آنزکتور و فیکسچر نگهدارنده.

شماتیک تجهیزات مورد استفاده در مطالعه: تصویری از اسپری در شکل ۱ مشاهده می‌شود. نازل آنزکتور به‌طور عمودی روی فیکسچر نصب می‌شود و سیال‌کاری که آب است، از طریق یک مخزن فشاربالا به پشت آنزکتور با فشار مورد نظر برای پاشش منتقل می‌شود. پشت آنزکتور بر سر راه آب ورودی فشارسنج به‌منظور کنترل فشار نصب شده است. در حالی که فشار پشت قابل تغییر است، پاشش در فشار محیط انجام می‌پذیرد. از استروپوسکوپ برای روشن‌سازی و منطقه‌ی عکس‌برداری استفاده می‌شود.

شکل ۲ تجهیزات سیستم لیزر را نشان می‌دهد. لیزر مورد استفاده

می‌شود، از آنزکتور تخلیه می‌شود. برای آنزکتوری که در بررسی حاضر مورد استفاده قرار گرفت برخی پارامترهای مهم در جدول ۲ آورده شده‌اند.

نتایج

الف) مطالعه‌ی تصویری

در این بررسی مراحل تشکیل پاشش در فشارهای مختلف، تا حداکثر ۴/۵bar عکس‌برداری و مورد مطالعه قرار گرفته است. این تصاویر در شکل ۴ برای فشارهای مورد بررسی آورده شده است. در آنزکتورهای پیچشی به دلیل گشتاور زاویه‌یی که سیال در راهگاه‌های پیچشی آنزکتور کسب می‌کند، پاشش در نهایت به صورت یک چتر مخروطی شکل در می‌آید. در فشارهای کم این چتر به صورت یک صفحه مایع پیوسته است. تولید قطرات از فرایند ایجاد و رشد ناپایداری در صفحه‌ی مایع خروجی شروع شده و نهایتاً به شکست آنها می‌انجامد.

مودهای مختلفی از شکست صفحه مایع با توجه به افت فشار یا سرعت خروجی اتفاق می‌افتد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، برای فشارهای خیلی کم (از ۰/۱۲bar تا ۰/۱۸bar) در اریفیس خروجی صفحه مایع حبابی شکل به وجود می‌آید که مرحله‌ی پیاپی^۴ نامیده می‌شود.^[۱۱] در شکل ۴ مشاهده می‌شود که در این مرحله شکستن مایع پیوسته به قطرات ریز حاصل می‌شود و طول حباب توخالی که در این مود می‌توان از آن به عنوان طول شکست^۵ نام برد، با افزایش فشار پشت کمی افزایش می‌یابد. مود دیگری از شکست را می‌توان بین فشارهای ۰/۲bar تا ۰/۵bar در نظر گرفت. در این مود حباب مایع باز شده و به یک چتر مایع پیوسته تبدیل می‌شود. این مرحله، مرحله‌ی تیولپ^۶ نام دارد.^[۱۱] در این مرحله مایع صاف و پیوسته که به شکل چتر مخروطی در آمده است، پس از طی فاصله‌یی از نازل ناپایدار شده و به صورت مجموعه‌یی از قطرات می‌شکند. در این مود از شکست با افزایش فاصله از نازل، ضخامت صفحه مایع تشکیل شده پیوسته کاهش می‌یابد تا جایی که سوراخ‌هایی در صفحه به وجود می‌آید. شکست و تولید قطرات در واقع از لبه‌های این سوراخ‌های به وجود آمده در صفحه مایع نشأت می‌گیرد.^[۱۲] با افزایش فشار پشت به بیش از ۰/۵bar حالت جدیدی از مراحل شکست صفحه مایع حاصل می‌شود (شکل ۴). در این حالت که حالت موجی^۷ نامیده می‌شود، امواج دایره‌یی شکل روی صفحه مایع شکل می‌گیرد. در واقع صفحه مایع اغتشاشاتی نوسانی را تجربه می‌کند و افزایش دامنه‌ی این امواج در نهایت به شکستن صفحه مایع در این مرحله منجر می‌شود.

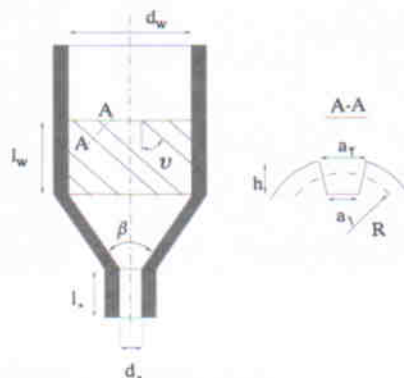
جدول ۱. مشخصات اپتیکی سیستم PDA.

اپتیک فرستنده	
لیزر آرگن	۷۵۰ mW
زاویه‌ی برخورد شعاع‌های نوری	۴/۵deg.
فاصله فرینج در جهت x	۶/۵۷۳۱ μm
فاصله فرینج در جهت y	۶/۲۳۴۵ μm
تعداد فرینج	۱۴
شیفت فرکانسی	۴۰ MHz
فاصله‌ی کانونی لنز	۶۰۰ mm
اپتیک گیرنده	
زاویه‌ی پخشی	۱۴۶deg.
فاصله‌ی کانونی لنز	۶۰۰ mm
حداکثر قطر	۳۸۰ μm

آنزکتور پیچشی

در شکل ۳ برشی از آنزکتور پیچشی به کار رفته در این بررسی‌ها آورده شده است.

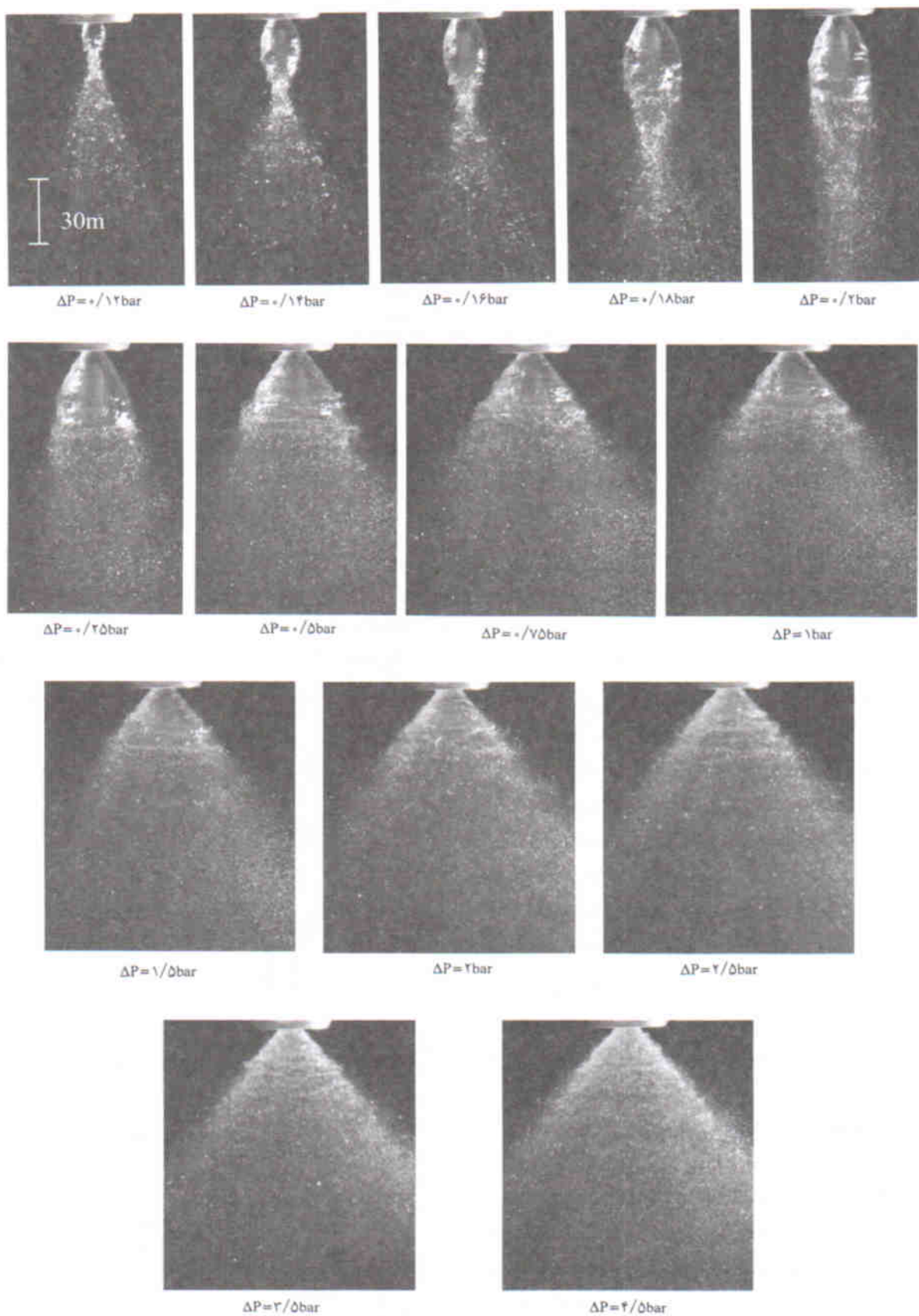
سیال از بالا به طور عمودی وارد آنزکتور با کانال ورودی به قطر d_w می‌شود، و سپس وارد یک راهگاه مارپیچ به طول L_w می‌شود که مقطع مارپیچ آن در شکل ۳، مقطع A-A، نشان داده شده است و سطح مقطع آن A_0 است. پس از آنکه سیال در عبور از این راهگاه‌ها (که تعداد آنها n عدد است) گشتاور زاویه‌یی لازم را گرفته و وارد نازل همگرا، و سپس اریفیس خروجی به طول L_n و سطح مقطع A_n



شکل ۳. شماتیک و پارامترهای هندسی آنزکتور مورد استفاده.

جدول ۲. ابعاد هندسی آنزکتور.

d_w (mm)	۲
a_1 (mm)	۱/۶
a_2 (mm)	۲/۵۵
h (mm)	۰/۹۵
\bar{R} (mm)	۲
ν (deg.)	۴۵/۴
n	۳



شکل ۴. شکل‌گیری پاشش در فشارهای مختلف.

K ثابت هندسی انژکتور است که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید: [۱۲]

$$K = \frac{2R}{r_s} \sin \nu \frac{A_s}{\sum A_s} \quad (2)$$

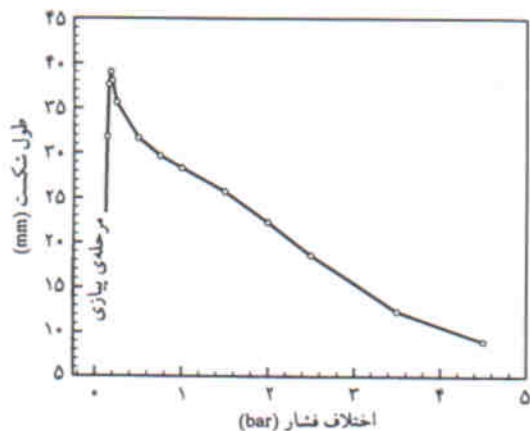
با توجه به مقادیر جدول ۱ مقدار $K = 1/513$ به دست می‌آید که در تحقیقات حاضر چون هندسه انژکتور ثابت است، پارامتر K نیز ثابت است.

از طرفی طبق اصل حداکثر دبی که در انژکتورهای پیچشی وجود دارد، و براساس آن همیشه حفره‌ی گازی طوری شکل می‌گیرد که دبی تخلیه شده حداکثر شود، پارامتر ϵ مطابق معادله‌ی زیر تابعی از پارامتر K خواهد شد: [۱۲]

$$k^2 = \left[\frac{2-\epsilon}{\epsilon} \right]^2 \quad (3)$$

چون K ثابت است، ϵ نیز ثابت بوده و با توجه به رابطه‌ی ۱ زاویه‌ی پاشش توسعه یافته ثابت می‌ماند که از روابط ۲، ۱ و ۳ مقدار آن با استفاده از توری ذکر شده برابر با ۹۸ درجه می‌شود، که با توجه به شکل ۵ از لحاظ تجربی این زاویه به ۹۰ درجه میل می‌کند. اختلاف بین زاویه‌ی اندازه‌گیری شده با نتایج نظری احتمالاً بر اثر افت فشار موجود در راه‌گاه‌های انژکتور است.

تغییرات طول شکست یا فشار پاشش در شکل ۶ مشاهده می‌شود. در مرحله‌ی پیاپی با افزایش فشار پاشش طول شکست تا ۴۰ میلی‌متر افزایش می‌یابد. بعد از این مرحله، طول شکست با افزایش فشار کاهش می‌یابد که در شکل ۶ کاملاً مشهود است. علت این پدیده (کاهش طول شکست با افزایش فشار) زیاد شدن سرعت، در نتیجه به وجود آمدن اغتشاشات قوی‌تر با دامنه‌ی بزرگ‌تر روی صفحه مایع است که موجب شکست سریع‌تر مایع پیوسته به قطرات ریز می‌شود. حداقل طول شکست در فشار ۴/۵ بار حدوداً برابر ۱۰ میلی‌متر است.



شکل ۶. تغییرات طول شکست با افزایش افت فشار.

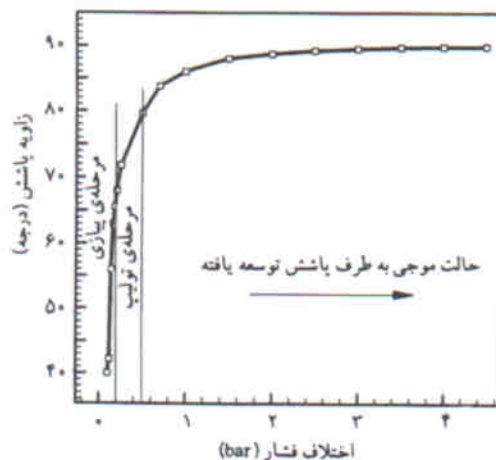
همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود با افزایش فشار فرکانسی امواج افزایش یافته، امواجی با طول کوتاه‌تر حاصل می‌شود و طول شکست نیز کاهش می‌یابد. این روند تا زمانی که فشار تا ۴/۵ bar افزایش می‌یابد مشاهده می‌شود (شکل ۴). برای فشارهای خیلی بالا، اغتشاشات اعمالی از محیط اطراف (وقتی که مایع از انژکتور خارج می‌شود) باعث می‌شود که شکست قبل از ایجاد امواج بر صفحه مایع خیلی نزدیک به دهانه‌ی نازل اتفاق بیفتد.

در شکل ۵ تغییرات زاویه‌ی اسپری با افت فشار مورد بررسی قرار گرفته است. در فشارهای خیلی کم در مرحله‌ی پیاپی زاویه پاشش کم‌ترین مقدار خود را دارد که برای انژکتور مورد آزمایش به حدود ۴۰ درجه می‌رسد، ولی با افزایش فشار پشت این زاویه سریعاً به حدود ۷۰ درجه افزایش می‌یابد. در فشارهای بالاتر در مرحله‌ی تیولپ زاویه‌ی پاشش باز هم افزایش می‌یابد ولی با شیبی کم‌تر از مرحله‌ی پیاپی. با افزایش بیشتر فشار و ورود به مرحله‌ی موجی، گام افزایش شیب زاویه‌ی پاشش با فشار پشت کم‌تر می‌شود تا به اصطلاح پاشش کاملاً شکل می‌گیرد و به پاشش توسعه یافته^۸ می‌رسد. در این مرحله زاویه با افزایش فشار پشت تقریباً ثابت می‌ماند (شکل ۵). در تحقیقات حاضر زاویه در مرحله پاشش توسعه یافته حدوداً تا ۹۰ درجه رسیده است.

با استفاده از قوانین حاکم بر جریان داخل انژکتور می‌توان زاویه‌ی پاشش را از لحاظ نظری به صورت زیر نوشت: [۱۲]

$$\alpha = 2 \arctg \frac{\epsilon k}{2-\epsilon} \quad (1)$$

که در آن پارامتر ϵ عبارت است از نسبت مساحت بخشی از ارفیس خروجی حاوی مایع به کل مساحت سطح مقطع خروجی. در حالتی که حفره‌ی گازی در میان ارفیس شکل گرفته باشد، این پارامتر کم‌تر از ۱ خواهد بود.



شکل ۵. تغییرات زاویه پاشش با افت فشار.

ارفیس انژکتور و بافاصله‌یی مشخص از دهانه‌ی آن، پارامترهای مورد نظر اندازه‌گیری شد. شکل ۷ شماتیک مقطع و نقاط اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. مقطع اندازه‌گیری بر روی صفحه‌یی در فاصله‌ی ۲ سانتی‌متر از صفحه‌ی نازل قرار داده شده و ۱۲۰ نقطه اندازه‌گیری شده است.

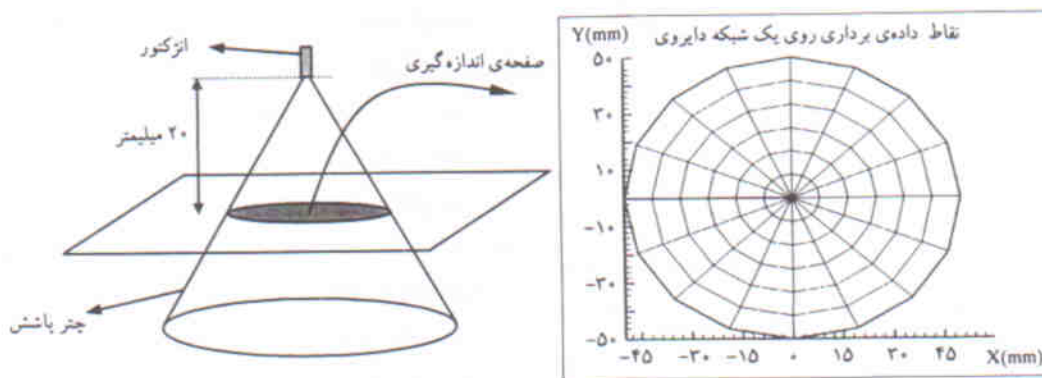
نتایج قطر و سرعت به‌صورت کانتور در پاششی با افت فشار \bar{v} در شکل ۸ مشاهده می‌شود. کانتورهای دایره‌یی سرعت کل و قطر تقارن نسبتاً خوبی را در این بررسی نشان می‌دهند. همچنین

ب) نتایج حاصله از روش PDA

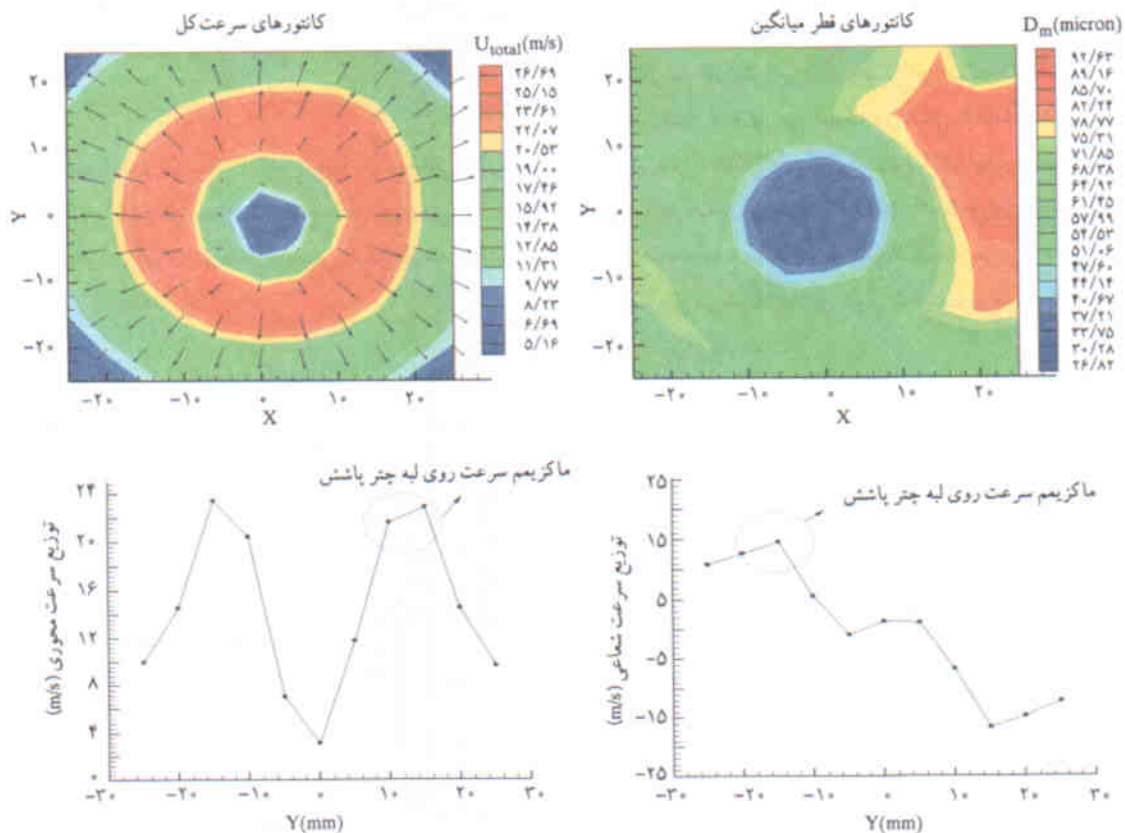
در این بررسی‌ها از PDA استفاده شده است. توزیع سرعت و توزیع قطر قطرات در دو صفحه‌ی مختلف عمود بر محل انژکتور و در راستای محور انژکتور اندازه‌گیری شده است. در ادامه نتایج حاصل از این آزمایشات به‌طور مختصر مورد مطالعه قرار خواهند گرفت.

مطالعه‌ی میدان پاشش عمود بر محور انژکتور

در این حالت با بررسی میدان پاشش در صفحه‌یی عمود بر محور



شکل ۷. مقطع و نقاط اندازه‌گیری در مطالعه‌ی میدان پاشش عمود بر محور آن.



شکل ۸. کانتورهای سرعت و قطر و توزیع سرعت روی یک قطر چتر پاشش در مقطع ۳ میلی‌متر از نازل انژکتور.

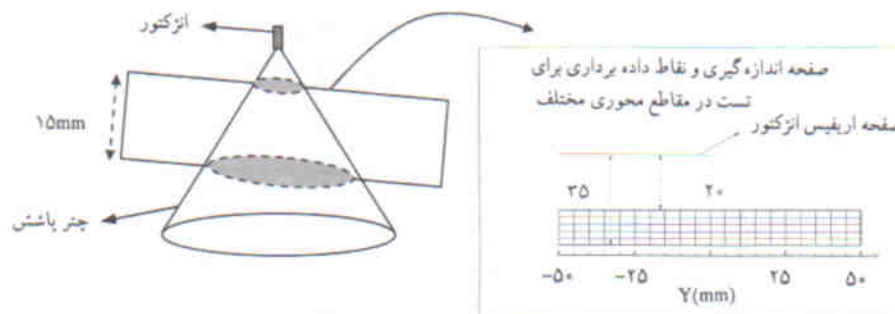
اطراف می‌تواند از فضای ناپیوسته‌ی بین قطرات به داخل میدان پاشش نفوذ کند. با این حرکت هوا، که از بیرون چتر پاشش به سمت مرکز آن صورت می‌گیرد، قطرات ریزتر که دارای وزن و گشتاور کم‌تری هستند به همراه هوا به سمت مرکز چتر پاشش کشیده می‌شوند و قطرات درشت‌تر روی یال و کمی خارج از آن باقی می‌مانند (شکل ۸).

مطالعه‌ی میدان پاشش در جهت محور انژکتور

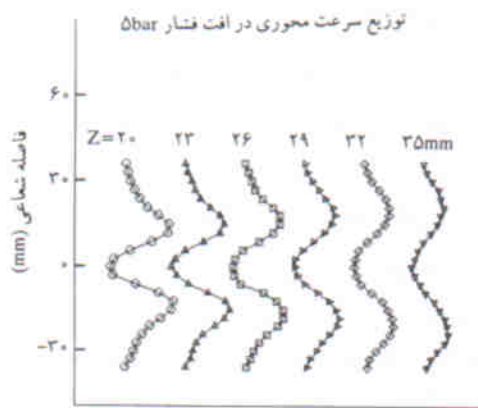
در این بخش از مطالعه‌ی میدان پاشش، نقاط اندازه‌گیری روی صفحه‌ی واقع شده‌اند که هم‌جهت با محور پاشش‌اند. شماتیک این مقطع در شکل ۹ نشان داده شده است با استفاده از این نوع مقطع اندازه‌گیری می‌توان خصوصیات میدان پاشش در جهت پایین دست نازل انژکتور را مورد بررسی قرار داد. ارتفاع صفحه‌ی اندازه‌گیری ۱۵ میلی‌متر است که از فاصله‌ی ۲۰ میلی‌متر از دهانه‌ی اریفیس انژکتور شروع می‌شود و تا فاصله‌ی ۳۵ میلی‌متری ادامه می‌یابد. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ توزیع سرعت محوری و یکنواختی شعاعی را در فواصل متفاوت سرعت محوری و یکنواختی شعاعی را در فواصل متفاوت

مشاهده می‌شود که بیشترین سرعت روی یال پاشش در شعاع حدود ۱۲/۵ میلی‌متر اتفاق می‌افتد که مقدار آن در کل صفحه در بعضی از نقاط نزدیک ۲۷ متر بر ثانیه نیز می‌رسد. همچنین بردارهای سرعت روی کانتور و مؤلفه‌های سرعت روی قطر $x=0$ mm در شکل مشاهده می‌شوند که نشان می‌دهد وقتی سیال از دیواره‌های اریفیس انژکتور خارج می‌شود، با حذف نیروی گریز از مرکزی که دیواره‌ی اریفیس به سیال وارد می‌کند، سرعت مماسی مایع بعد از خروج از اریفیس به سرعت شعاعی تبدیل می‌شود. به طوری که سرعت مماسی در مقایسه با دو مؤلفه‌ی دیگر بسیار کم‌تر بوده و به حدود ۱/۵ متر بر ثانیه می‌رسد.

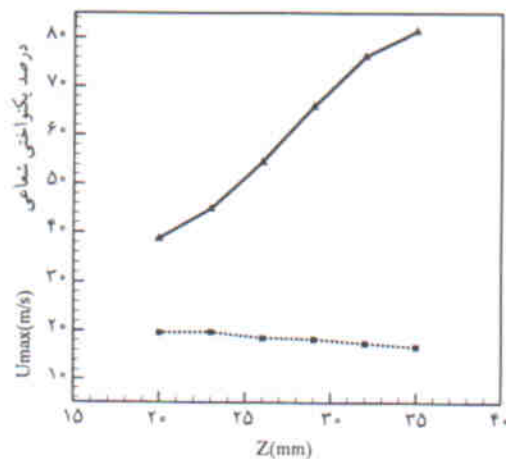
کانتور قطر (شکل ۸) نشان می‌دهد که کم‌ترین قطر قطرات در میان چتر پاشش است و بیشترین قطر قطرات روی یال چتر پاشش و کمی بیرون یال‌اند. ممکن است علت وجود چنین پدیده‌ی حرکت هوای اطراف چتر پاشش باشد. سرعت اولیه‌ی نسبتاً زیاد مایع باعث می‌شود که به محض خروج آن از اریفیس انژکتور و ورودش به محیط خارج از انژکتور باعث کشیده شدن هوای اطراف به سمت یال پاشش می‌شود. با شکسته شدن مایع پیوسته و به وجود آمدن قطرات، هوای



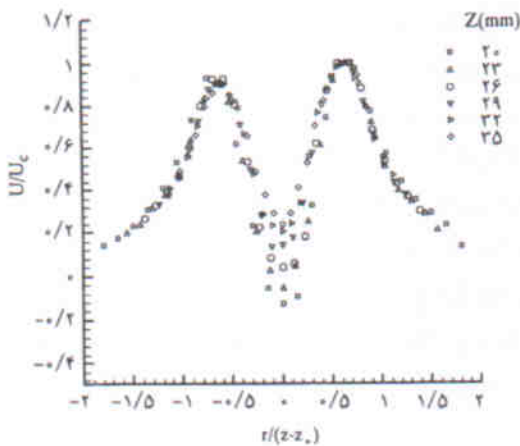
شکل ۹. مقطع و نقاط اندازه‌گیری در مطالعه میدان پاشش در جهت محور آن.



شکل ۱۱. توزیع سرعت محوری برحسب فاصله.



شکل ۱۰. سرعت و یکنواختی شعاعی آن برحسب فاصله محوری.



شکل ۱۲. خودمتشابهی در سرعت محوری قطرات.

واقع توسط هوای اطراف به داخل حمل شده‌اند و علاوه بر آنکه تراکم این قطرات در وسط بسیار کم است حرکت آنها نیز در همسایگی محور پاشش (پاشش مخروطی و میان تهی) تابع حرکت هوای مکیده شده به داخل پاشش است. بنابراین در این منطقه خودمتشابهی صدق نمی‌کند.

مطالعه‌ی تغییرات فشار پاشش

در این بخش، اثر تغییرات افت فشار مایع روی میدان پاشش حالت دوم (حالتی که مقطع اندازه‌گیری در جهت محور پاشش قرار دارد)، بررسی شده است. افت فشار مایع از ۴ bar تا ۱۰ bar افزایش داده شده است و روند تغییرات در کانتورهای سرعت و بردارهای آن در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که ذکر شد، مشاهده می‌شود که سرعت روی هر دو یال پاشش بیشترین است و با افزایش فشار سرعت نیز افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۳ نتیجه‌ی که در بخش قبل در مطالعه‌ی تصویری پاشش و مقایسه‌ی آن با تئوری گرفته شد مجدداً مشاهده می‌شود. همچنین با افزایش فشار در محدوده‌ی فشارهایی که پاشش توسعه‌یافته شکل می‌گیرد با وجود افزایش سرعت کل قطرات، یال‌ها با هم موازی بوده و زاویه‌ی پاشش ثابت باقی مانده است. از طرفی افزایش فشار مایع که باعث می‌شود مایع خروجی سرعت بیشتری به خود بگیرد باعث افزایش نیروهای فشاری و آیرودینامیکی روی مایع می‌شود. این پدیده موجب کاهش طول شکست، و نتیجتاً تشکیل قطرات ریزتری می‌شود. شکل ۱۴ نشانگر تغییرات قطر میانگین ساوتر در نتیجه‌ی افت فشار مایع است. می‌توان این تغییرات را با تناسب زیر نشان داد:

$$SMD \propto \Delta P^d$$

شکل ۱۴ به صورت لگاریتمی رسم شده است تا شیب رابطه‌ی

محوری در افت فشار ۵ bar نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در ۲۰ میلی‌متری پایین دست اریفیس، توزیع سرعت محوری در دو نقطه ماکزیم است ولی در وسط و کنارها حداقل می‌باشد (شکل ۱۱). دو نقطه‌ی که سرعت محوری در آنها بیشینه است در محل دو یال چتر پاشش و روی قطر آن واقع شده‌اند که در آنجا بیشترین تراکم و اینرسی قطرات وجود دارد. همچنین در این فاصله از صفحه مشاهده می‌شود که فاصله‌ی بیشینه‌ی سرعت تا کمینه‌ی آن زیاد بوده ولی با افزایش فاصله از اریفیس انژکتور، این فاصله کم می‌شود و قله‌های بیشینه‌ی سرعت نیز هموارتر شده و سرعت به سمت یکنواخت شدن پیش می‌رود. این فرایند اثر عمل کردن نیروی پسای محیط اطراف روی قطرات را نشان می‌دهد. در شکل ۱۰ روند کاهش سرعت با دور شدن از انژکتور و همچنین افزایش یکنواختی شعاعی نشان داده شده است که در آن سرعت محوری بیشینه در محدوده‌ی مورد آزمایش حدود ۳ متر بر ثانیه از فاصله‌ی ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متری کاهش می‌یابد و یکنواختی شعاعی که به صورت زیر با پارامتر σ_{UR} تعریف شده است، در حدود ۴۰ درصد افزایش نشان می‌دهد.

$$\sigma_{UR} = \frac{U_{mean}}{|U_{max} - U_{min}|}$$

همچنین با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که دو قله مربوط به حداکثر سرعت محوری با دور شدن از اریفیس انژکتور از هم دورتر می‌شوند. این پدیده احتمالاً نشان دهنده‌ی سرعت شعاعی حرکت قطرات و دور شدن آنها از محور پاشش است. وجود خودمتشابهی نیز در این حالت مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. خودمتشابهی در یک جت هنگامی برقرار است که شرط زیر در آن جت برقرار باشد.

$$U = U_c(z)f(\eta)$$

در این رابطه η پارامتری بعد است که مقیاس طولی است و چنین تعریف می‌شود:

$$\eta = r/(z-z_0)$$

$U_c(z)$ نیز یک سرعت مشخصه است. در شکل ۱۲ مقدار نسبت U/U_c برحسب «برای افت فشار ۵ bar در پاشش فعلی رسم شده است. در این شکل، وجود خود متشابهی بر روی یال این پاشش پیچشی و اطراف آن در فواصل محوری به وضوح دیده می‌شود. اما در میان چتر پاشش و اطراف محور پاشش خودمتشابهی صدق نمی‌کند.

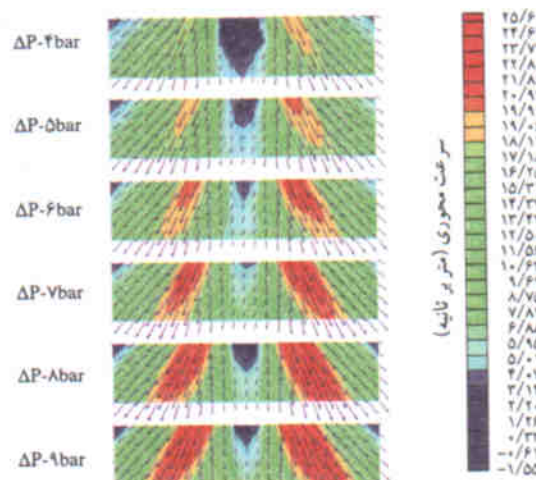
قطرات روی یال پاشش تقریباً نقش یک جت را بازی می‌کنند با این تفاوت که پیوسته نیستند، ولی قطرات در منطقه‌ی همسایگی محور پاشش این نقش را ایفا نمی‌کنند. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، قطراتی که در میان چتر پاشش و نزدیک به محور آن وجود دارند، در

پاشش توسعه یافته، زاویه‌ی پاشش تقریباً مستقل از فشار پاشش می‌شود و مقدار آن ثابت می‌شود. این نتیجه از طریق اندازه‌گیری سرعت با روش PDA در مقاطع مختلف نازل و فشارهای متفاوت نیز به دست آمده است. همچنین نتایج تجربی با تئوری حاکم بر جریان داخل انژکتور در مورد زاویه‌ی پاشش مقایسه شده و تطابق مناسبی مشاهده شد. در دست داشتن گام تغییرات زاویه‌ی پاشش با فشار پشت از عواملی است که در طراحی انژکتور بسیار مفید است.

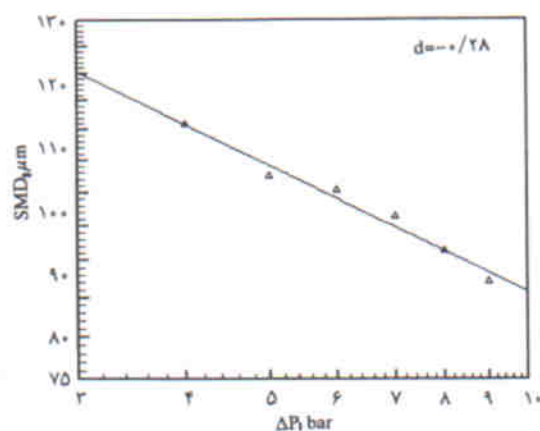
آزمایشات با روش PDA در سه حالت مختلف انجام شده است. یک بار مقطع و نقاط اندازه‌گیری در جهت عمود بر محور پاشش به فاصله ۲۰ میلی‌متری از اریفیس قرار گرفت که در نتیجه دایره‌ی حاصل از تقاطع صفحه‌ی اندازه‌گیری و چتر پاشش به قطر تقریباً ۱۲/۵ میلی‌متر به طور کامل و با تقارن خوب به دست آمده است. فشار پاشش در این حالت ۷ بار اعمال شده است. نتایج در این حالت نشان داده‌اند که قطر و سرعت قطره با دور شدن از محور پاشش و نزدیک شدن به یال چتر پاشش افزایش می‌یابند. بیشینه‌ی سرعت در این حالت به حدود ۲۷ متر بر ثانیه روی یال می‌رسد. روند تغییرات قطر نیز مانند سرعت است. قطرات با قطر حداکثر روی یال و اطراف آن باقی می‌مانند. قطرات ریزتر در نزدیکی محور پاشش مجتمع می‌شوند.

بررسی دوم شامل مطالعه‌ی میدان پاشش در جهت محور پاشش با استفاده از PDA بوده است که در آن مقطع و نقاط اندازه‌گیری در جهت محور پاشش و منطبق بر آن قرار گرفته‌اند. عرض صفحه‌ی اندازه‌گیری در جهت محور پاشش در این حالت ۱۵ میلی‌متر بوده که از ۲۰ میلی‌متری شروع شده تا ۳۵ میلی‌متری پایین دست اریفیس ادامه می‌یابد. فشار پاشش در این حالت ۵ بار بوده و تغییرات سرعت و قطر قطرات با دور شدن از اریفیس مورد مطالعه قرار گرفته است. اندازه‌گیری‌ها نشان دادند سرعت با دور شدن از دهانه‌ی اریفیس کاهش یافته و یکنواختی شعاعی سرعت در حدود ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. علت این پدیده نیز اثرات نیروهای خارجی (نیروهای آیرودینامیکی هوای اطراف) بر قطرات در حال حرکت است. همچنین در این حالت خودمتشابهی پاشش مذکور مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد روی یال چتر پاشش خودمتشابهی صادق است. در حالی که در همسایگی محور چتر پاشش، که تراکم و تمرکز قطرات و فضای خالی و میان تهی پاشش است، خودمتشابهی صدق نمی‌کند. اصولاً در منطقه‌ی میانی این انژکتور پیچشی، که چتر پاشش در آن میان تهی است حرکت قطرات تابع حرکت هوای میان چتر

اثر تغییرات فشار پاشش



شکل ۱۳. کانتورهای سرعت محوری در مقاطع و فشارهای پاشش مختلف.



شکل ۱۴. خودمتشابهی در پاشش پیچشی.

بالا را نشان دهد. این شیب برای انژکتورهای پیچشی بین ۰/۲۷۵- تا ۰/۴۴- گزارش شده است.^[۱۱] در بررسی فعلی مقدار توان این رابطه با توجه به شکل ۱۴ برابر ۰/۲۸- است که همخوانی نسبتاً خوبی با نتایج مرجع گزارش شده دارد.

نتیجه‌گیری

از بررسی‌های تجربی می‌توان نتیجه گرفت که در پاشش انژکتورهای پیچشی با افزایش فشار پاشش از فشارهای کم دو مرحله‌ی پاشش (قبل از رسیدن به پاشش توسعه یافته) قابل مشاهده است.

۱. مرحله‌ی پیازی: در این مرحله زاویه‌ی پاشش و طول شکست به شدت با افزایش فشار افزایش می‌یابند.

۲. مرحله‌ی تولیپ: که در این مرحله نرخ افزایش زاویه‌ی پاشش و طول شکست با افزایش فشار کم می‌شود. با نزدیک شدن به سمت

در این حالت از ۴ تا ۱۰ بار به فاصله‌ی ۱ بار افزایش یافته است. مشاهده شد که با افزایش فشار پاشش سرعت کل قطرات افزایش یافته و در عین حال قطرات ریزتری تشکیل می‌شود. کاهش در قطر قطرات با استفاده از رابطه‌ی $SMD \propto \Delta P^{0.4}$ تقریب زده شده است، که این رابطه با اعداد به دست آمده از نتایج قبلی تطابق بسیار خوبی دارد.

پاشش است و قطرات به جز ضخامت چتر پاشش گشتاور جهت‌دار مستقلی را از خود ندارند. حالت سوم از آزمایشات PDA به مطالعه‌ی تجربی اثرات ناشی از تغییرات افت فشار پاشش روی سرعت و قطر در میدان پاشش اختصاص یافته است. در این مطالعه از همان نقاط و مقطع اندازه‌گیری در حالت دوم استفاده شده است. افت فشار پاشش

پانوش

1. Phase Doppler Anemometry (PDA)
2. coherent
3. beam splitter
4. onion stage
5. breakup length
6. tulip stage
7. wavy stage
8. fully developed spray

منابع

1. Liquid Rocket Engine Injectors, NASA SP-8089 (1976).
2. Dombrowski, N., and Hasson, D., "The Flow Characteristics of Swirl (Centrifugal) Spray Pressure Nozzles with Low Viscosity liquids", *AICHE Journal*, Imperial College, London, England., **15**, (4) pp 604-611 (1969).
3. Lee, S.Y. and Tankin, R.S., "Study of Liquid Spray (Water) in a Non-Condensable Environment (Air)", *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **27**, (3) pp 351-361 (1984).
4. Yule, A.J., Sharif, R.A., Jeong, J.R., Nasr, G.G., and James, D.D., "The Performance Characteristics of Solid-Cone-Spray Pressure Swirl Atomizers", *Atomization and Sprays*. **10**, pp 627-646 (2000).
5. Li X., and Shen J., "Experimental Study of Sprays from Annular Liquid Jet Breakup", *Journal of Propulsion and Power*. **15**, (1) pp 103-110 (1999).
6. Schmidt D.P., Nouar, I., Senecal, P.K., Rutland, C.J., Martin, J.k. and Reitz, R.D., "Pressure-Swirl Atomization in the Near Field", *SAE Technical Papers Series* 1999-01-0496, pp 113-126 (1999).
7. Chen, S.K., Lefebvre, A.H., and Rollbuhler, J., "Factors Influencing the Effective Spray Cone Angle of Pressure-Swirl Atomizers", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, **114**, pp 97-103 (1992).
8. Wang, X.F. and Lefebvre, A.H., "Mean Drop Sizes from Pressure-Swirl Nozzles", *J. Propulsion*, **3**, (1), pp 11-18 (1987).
9. Ghorbanian, K., Ashjaee, M., Soltani, M.R., Mesbahi, M.H. and Morad, M.R., "PDA Droplet Size and Velocity Measurement of a Swirl Atomized Spray", 9th Asian Congress of Fluid Mechanics (2002).
۱۰. مراد، محمدرضا، سلطانی، محمدرضا، اشجعی، مهدی. و قربانیان، کاوه. «مقایسه نتایج با یک مدل لاگراژی برای توزیع سرعت قطرات در پاشش حاصل از انژکتور پیجشی». کنفرانس مهندسی هوافضا (بهمن ۱۳۸۱).
11. Lefebvre H., "Atomization and Sprays", Hemisphere Publishing Co. (1989).
12. Bayvel, L. and Orzechowski, Z., "Liquid Atomization", Taylor & Francis Publishing Co. (1993).