

## بررسی تجربی پارامترهای عملکردی یک انژکتور پیچشی تک پایه

عطاله پورمحمود<sup>۱</sup>، مصطفی قربان حسینی<sup>۲</sup>، آزاده کبریایی<sup>۳</sup> و محمد فرشچی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف (نویسنده مخاطب)، poormhamood@ae.sharif.ir

۲- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، mostafa\_gh\_hosseini@alum.sharif.ir

۳- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، kebriee@sharif.ir

۴- استاد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، farshchi@sharif.edu

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۶، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۵/۴/۱، پذیرش: ۹۵/۴/۱۲)

در این پژوهش، پارامترهای عملکردی یک انژکتور پیچشی، به عنوان تابعی از اعداد رینولدز و وبر، مطالعه شده است. زاویه پاشش انژکتور، طول شکست صفحه مایع و ضریب تخلیه انژکتور، از جمله پارامترهایی اند که به منظور شناخت رفتار انژکتور، بررسی شده و تغییرات آن‌ها به صورت تابعی از اعداد رینولدز و وبر بیان شده‌اند. در نهایت نیز، نتایج به دست آمده با نتایج مدل‌هایی نظیر مدل لایسا (LISA) مقایسه و ارزیابی شده‌اند. انژکتور مورد استفاده در این پژوهش، یک انژکتور پیچشی تک پایه ساده بوده و از آب به عنوان سیال عامل استفاده شده است. شرایط انجام تمامی آزمایش‌ها شرایط استاندارد اتمسفریک بوده است. تصویربرداری از میدان پاشش با استفاده از روش سایه‌نگاری انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در رینولدز  $3 \times 10^4$ ، رژیم پاشش انژکتور از رژیم قطره‌چکانی به رژیم اتمیزاسیون تغییر یافته و با افزایش بیشتر رینولدز تا حد  $3/7 \times 10^4$ ، رژیم کاملاً توسعه یافته پاشش (که مخروط پاشش کامل می‌شود) حاکم می‌شود. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که طول شکست صفحه مایع با عبارت  $We^{-0.5} Re^{0.6}$  به صورت خطی متناسب است. از طرفی، با افزایش رینولدز، زاویه پاشش انژکتور ابتدا افزایش یافته و با افزایش بیشتر رینولدز، تقریباً ثابت می‌شود.

**کلیدواژگان:** انژکتور پیچشی، شرایط اتمسفریک، عدد رینولدز، طول شکست، زاویه افشانه

### مقدمه

امروزه، با مشخص شدن نقش کلیدی زیرسامانه پاشش در بهبود بازده احتراق، توان تولیدی و یا نیروی پیشران بسیاری از موتورهای دیزلی، توربینی و راکتی، از انژکتورهای پیچشی برای طراحی این موتورها استفاده می‌شود. در واقع، در قیاس با انواع مختلف انژکتورها (نظیر انژکتورهای برخوردی و برشی)، استفاده از انژکتورهای پیچشی از چند جهت ارجح است: اولاً، به خاطر اختلاط یکنواخت و موثر مولفه‌های پیشران در داخل و یا خارج از انژکتور (بسته به هندسه انژکتور) و در نتیجه ضریب اختلاط مناسب انژکتور؛ ثانیاً، به علت حساسیت کم‌تر مشخصه‌های اتمیزاسیون به خطاهای ساخت و در نهایت به علت کوچک‌تر بودن قطر قطره میانگین از قطر قطره ایجاد شده توسط انژکتور برشی (با همان افت فشار و جریان جرمی) و همچنین توزیع یکنواخت‌تر اندازه قطرات نسبت به انواع دیگر انژکتورها.

تاکنون مطالعات تجربی و عددی زیادی در زمینه پاشش و اختلاط انژکتورهای پیچشی انجام شده است. برای مثال، هان و همکارانش [۱] و کیم و همکارانش [۲] اثرات تورفتگی المان داخلی یک انژکتور پیچشی هم‌محور (دوپایه) را بر روی مشخصه‌های اختلاط در شرایط اتمسفریک بررسی کردند. آن‌ها از نفت سفید به عنوان سوخت و از آب به عنوان شبیه‌ساز اکسنده استفاده کردند. اثر زاویه بازشدگی جریان داخلی با تغییر میزان تورفتگی المان داخلی بررسی شد. مشاهدات حاکی از آن بود

که بازده اختلاط و توزیع جرمی مولفه‌ها حساسیت زیادی به طول تورفتگی انژکتور دارد. همچنین قطر متوسط ساوتر<sup>۱</sup> قطرات با افزایش طول تورفتگی اندکی کاهش می‌یابد. استراکی و همکارانش [۳]، با مطالعه بر روی مشخصه‌های افشانه<sup>۲</sup> انژکتورهای پیچشی هم‌محور، اثرات افزایش فشار محفظه را تا حد ۳۰ بار و در یک بازه وسیع از نسبت تکانه مایع به گاز (۰/۱ تا ۱۰۰) بررسی کردند. آن‌ها از آب و هلیوم/نیتروژن به‌عنوان شبیه‌ساز پیش‌راننده استفاده کردند. نتایج مشاهدات نشان می‌داد که با افزایش تکانه گاز هم‌محور، زاویه بازشدگی افشانه مایع کاهش می‌یابد. همچنین، اندازه قطر قطره میانگین در قیاس با انژکتور هم‌محور برشی (با همان جریان جرمی) کوچک‌تر است. کیم و همکارانش [۵،۴] اثرات چگالی گاز محیط اطراف را بر روی زاویه بازشدگی صفحه مایع و طول شکست آن در انژکتورهای پیچشی تک‌پایه و هم‌محور (دوپایه) بررسی کردند. آن‌ها از آب به‌عنوان سیال شبیه‌ساز اکسند استفاده کردند. زاویه اندازه‌گیری شده افشانه تا قبل از شکست صفحه مایع تقریباً در کل بازه فشاری محفظه (۱ تا ۴۰ بار) ثابت ماند، با این حال، با افزایش فشار محفظه، به‌علت افزایش چگالی گاز اطراف و در نتیجه افزایش نیروی آیرودینامیکی وارده به صفحه مایع، طول شکست آن کاهش یافت.

تعدادی از پژوهش‌های تجربی انجام‌شده در زمینه انژکتورهای پیچشی به بررسی رفتار دینامیکی و نیز پاسخ آکوستیکی آن‌ها اختصاص یافته‌است. در این باره، به‌تازگی، خیل و همکاران [۶] مشخصه‌های دینامیکی یک انژکتور پیچشی را در فرکانس‌های پایین استخراج کردند. آن‌ها برای این کار، با استفاده از یک مولد پالس مکانیکی، نوسانات اجباری فشاری تولید کردند و مقادیر نوسانی دبی، افت فشار، ضخامت فیلم مایع و سرعت محوری را اندازه‌گیری کردند. آن‌ها، نهایتاً، نحوه هم‌بستگی فازی بین کمیات مذکور و محرک را پیدا کردند. همچنین فرکانس مشخصه انژکتور را به‌عنوان یک تشدیدکننده هم‌هولتز<sup>۳</sup> شناسایی کردند. چانگ و همکاران [۷] نیز مشخصه‌های دینامیکی یک انژکتور پیچشی ساده را به‌عنوان تابعی از هندسه انژکتور به‌دست آوردند. آن‌ها برای این کار انژکتوری با قابلیت تغییر طول ناحیه چرخش، قطر ناحیه چرخش، تعداد ورودی‌های مماسی و قطر چندراهه<sup>۴</sup> طراحی کردند. فشار خط تغذیه با استفاده از یک مولد پالس هیدرودینامیکی تحریک شد و اثر این تحریک بر فشار چندراهه، فشار خروجی انژکتور و نیز ضخامت فیلم مایع در خروجی انژکتور ارزیابی شد. آن‌ها، نهایتاً، به این نتیجه رسیدند که قطر چندراهه و تعداد ورودی‌های مماسی، نسبت به دیگر پارامترهای هندسی انژکتور، تاثیر بیشتری بر مشخصه‌های دینامیکی انژکتور پیچشی ساده دارند.

علاوه بر مطالعات تجربی، اخیراً پژوهش‌های عددی زیادی در این زمینه انجام شده است. کیم و هیستر [۸] ناپایداری‌های هیدرودینامیکی صفحه مایع درون ناحیه تورفتگی یک انژکتور پیچشی هم‌محور را مطالعه کردند. آن‌ها با فرض تعادل ترمودینامیکی و تکانه‌ای بین فازهای مایع و گاز در سرتاسر میدان جریان، یک مدل جریان همگن محلی توسعه دادند. نتایج اولیه نشان می‌داد که با افزایش نسبت چگالی گاز به مایع، حرکت چرخشی و نوسانات مایع پاشیده شده بیش‌تر می‌شوند. پارک و هیستر [۹] سطح آزاد و شکل افشانه مایع پاشیده‌شده از یک انژکتور پیچشی را بررسی کردند. تحلیل آن‌ها بر مبنای یک روش المان مرزی و با فرض جریان متقارن محوری، غیرلزج و تراکم‌ناپذیر انجام شد. ضخامت فیلم محاسبه شده و زاویه مخروط افشانه با نتایج تخمینی تئوری‌های کلاسیک به‌خوبی تطابق داشت.

اگرچه مطالعات پیشین در شناخت بهتر فیزیک حاکم بر انژکتورهای پیچشی بسیار موثر بوده است، اما همچنان بعضی از مشخصه‌های اصلی این نوع از انژکتورها مغفول واقع شده‌اند. برای مثال، تاکنون هیچ رابطه تجربی متقن و معتبری برای برخی از پارامترهای عملکردی مهم و کاربردی نظیر طول شکست صفحه مایع ارائه نشده است. در این پژوهش، علاوه بر بررسی کمی و کیفی مشخصه‌های ماکروسکوپی (نظیر زاویه بازشدگی، طول شکست) یک انژکتور پیچشی متداول، برای اولین بار، ارتباط این مشخصه‌ها با اعداد رینولدز و وبر در قالب یک رابطه تجربی ارائه شده است. همچنین، نتایج آزمون تجربی با نتایج یکی از

1. Sauter Mean Diameter (SMD)  
2. Spray  
3. Helmholtz Resonator  
4. Manifold

مشهورترین تئوری‌های شکست افشانه انژکتور (تئوری لیسا<sup>۱</sup>) مقایسه و محدوده اعتبار این تئوری ارائه شده است. در این پژوهش، برای اولین بار، ثابت شده است که رابطه برآمده از تئوری لیسا حتی برای صفحات مایع مخروطی (به وجود آمده از یک انژکتور پیچشی) نیز صادق است.

## روش تجربی

نمایی از بستر تجربی انجام این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. اجزای مختلف این آزمونگر عبارت‌اند از: مخزن فشارگذار، رگولاتور، منبع آب، سیستم نوری شامل دوربین نیکون مدل D7100 و منبع نور و عدسی، روماتر، گیج فشاری با قابلیت اندازه‌گیری فشار تا ۴۰ بار، لوله‌ها و اتصالات، سازه جمع‌کننده سیال پاشیده شده و انژکتور. مخزن فشار که برای تامین فشار پشت انژکتور استفاده می‌شود یک منبع پر فشار گاز نیتروژن است که قابلیت تحمل فشار تا حد ۲۰۰ بار را دارد. این منبع از طریق اتصالاتی به منبع آب وصل شده است. با استفاده از یک رگولاتور گازی، فشار روی مخزن مایع در محدوده ۲۰۰ تا ۲۰ بار قابل تنظیم است. خروجی مخزن آب توسط یک لوله به یک پنل وارد می‌شود که در آن یک دبی‌سنج، یک فشارسنج و یک شیر سوزنی برای کنترل دبی قرار دارد. خروجی کنترل پنل توسط لوله‌ای به سرانژکتور متصل می‌شود.

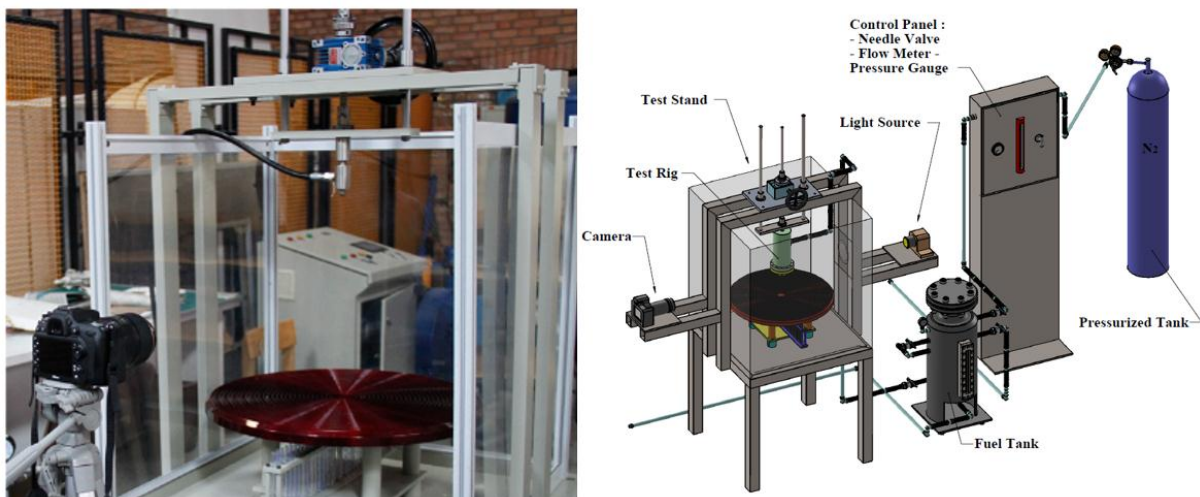


Figure 1- Schematic (right) and actual (left) images of the injector test stand  
 شکل ۱- آزمونگر انژکتور (سمت راست: طرحواره کل آزمونگر، سمت چپ: تصویری از آزمونگر انژکتور)

انژکتور پیچشی استفاده شده در این تحقیق یک انژکتور فشاری-پیچشی تک پایه است. شکل ۲، ابعاد هندسی این انژکتور نشان داده شده است.

برای اندازه‌گیری اپتیکی از سیستم سایه‌نگاری<sup>۲</sup> استفاده شده است. در این روش با تابش نور از پشت، در صورت وجود مانع بین منبع نور و صفحه دوربین، سایه مانع بر روی صفحه نقش می‌بندد. به همین دلیل، تصاویر سایه‌نگاری شامل یک زمینه نورانی (مربوط به نور منبع) و یک سایه شکل‌گرفته از وجود مانع است. عموماً، استفاده از روش سایه‌نگاری در شرایط وجود یک ماده با ضریب شکست بالا (مانند آب) مرسوم است. به طور کلی، سیستم سایه‌نگاری شامل دو جز اساسی است؛ منبع نور و بخش ضبط داده‌ها. در روش سایه‌نگاری، معمولاً از فلاش لامپ، تولید جرقه، نورهای ال‌ای‌دی و یا لیزر به‌عنوان

1. Liquid Instability Sheet Atomization (LISA)  
 2. Shadowgraphy

منبع نور استفاده می‌شود [۱۰]. در این آزمایش، از یک ال‌ای‌دی تک‌نوره سبزرنگ با توان ۱۰۰۰ وات و همچنین دو عدسی، یکی برای موازی کردن نور و دومی برای متمرکز کردن نور در لنز دوربین، استفاده شده است. به منظور تهیه تصاویری منجمد از افشانه پاشش، زمان نورگیری دوربین در تمام شرایط عملکردی روی ۰/۰۰۰۱۲۵ ثانیه تنظیم شده است. طرحواره سیستم سایه‌نگاری استفاده شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

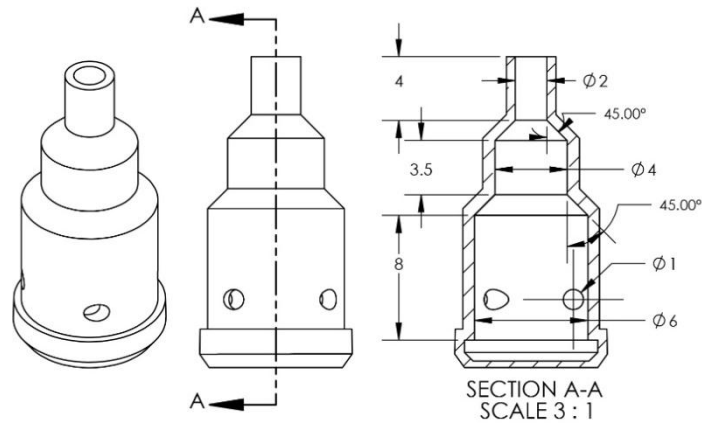


Figure 2- Cutted section view of the swirl injector  
 شکل ۲- نماهای کامل و برش خورده از انژکتور مورد استفاده

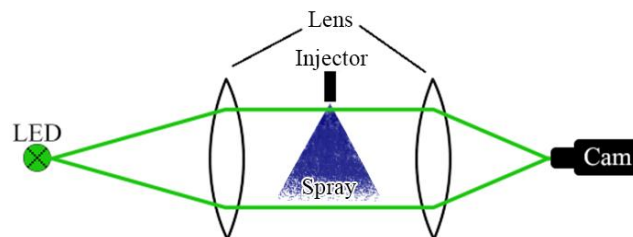


Figure 3- A simple schematic of the shadowgraphy setup  
 شکل ۳- طرحواره‌ای ساده از سیستم سایه‌نگاری

نهایتاً، تصاویر ضبط شده توسط دوربین، پردازش شده و مشخصات عملکردی انژکتور در شرایط مختلف محاسبه می‌شوند. جدول ۱ شرایط انجام آزمون‌ها را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که برای به حداقل رساندن خطای اندازه‌گیری و اطمینان از تکرارپذیری نتایج، هر آزمایش چندین مرتبه انجام شده است.

جدول ۱- شرایط انجام آزمایش‌ها

Table 1- Test Conditions

Pressure Drop (bar)	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
Mass Flow Rate (g/sec)	8.15	11.46	13.35	15.79	18.07	17.96	19.52	21.43	23.42	23.44	24.59
Reynolds ( $\times 10^{-5}$ )	0.28	0.35	0.4	0.45	0.49	0.53	0.56	0.6	0.63	0.66	0.69
Pressure Drop (bar)	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	
Mass Flow Rate (g/sec)	25.88	26.46	27.2	30.85	33.08	33.44	33.97	34.79	35.35	37.17	
Reynolds ( $\times 10^{-5}$ )	0.72	0.75	0.77	0.8	0.82	0.85	0.87	0.89	0.91	0.94	

## نتایج

همان‌طور که در منابع مختلف نیز عنوان شده است [۱۱-۱۵]، حالت‌های مختلفی از شکست صفحه مایع، با توجه به مقدار افت فشار دو سر انژکتور، رخ می‌دهد. این حالت‌ها به صورت زیر نام‌گذاری می‌شوند: حالت قطره‌چکانی<sup>۱</sup>، حالت پیازی<sup>۲</sup>، حالت لاله‌گون<sup>۳</sup> و حالت اتمیزاسیون<sup>۴</sup>. حالت چکیدن در افت فشارهای کم رخ می‌دهد و مایع، به صورت قطره‌ای، از خروجی نازل انژکتور می‌چکد. 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. افزایش بیشتر فشار، باعث باز شدن مخروط می‌شود و حالت بعدی، یعنی همان حالت لاله‌گون، را شکل می‌دهد. نهایتاً، با افزایش بیشتر فشار، مخروط پاشش به حالت کاملاً توسعه‌یافته می‌رسد و یک مخروط کامل را به وجود می‌آورد. در این پژوهش، تمامی حالت‌های مذکور در افت فشارهای مختلف مشاهده شد. در شکل ۴، به‌عنوان نمونه، تصاویر مربوط به تعدادی از این حالت‌ها نشان داده شده است. نتایج آزمایش این انژکتور نشان می‌دهد که برای انتقال از حالت لاله‌گون به حالت اتمیزاسیون عدد رینولدزی<sup>۵</sup> برابر با  $3 \times 10^4$  نیاز است (تعریف رینولدز برحسب قطر نازل انژکتور) و برای اعداد رینولدز بالاتر از حد  $3/7 \times 10^4$  تقریباً می‌توان گفت که جریان خروجی از انژکتور کاملاً توسعه یافته می‌یابد؛ بدین معنا که زاویه پاشش تقریباً ثابت باقی می‌ماند و تابع عدد رینولدز نیست. دبی عبوری از یک انژکتور پیچشی با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌شود.

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

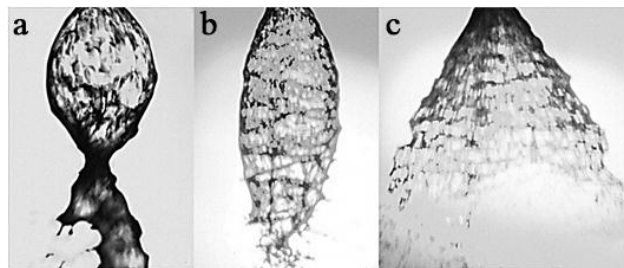


Figure 4- liquid sheet breaking modes (A: Onion mode, B: Tulip mode, C: Atomization mode)

شکل ۴ - حالت‌های مختلف شکست صفحه مایع: الف) حالت پیازی، ب) حالت لاله‌گون، ج) حالت اتمیزاسیون

در این رابطه  $\dot{m}$  دبی عبوری از انژکتور،  $A_n$  مساحت خروجی نازل انژکتور،  $\rho$  چگالی مایع عبوری از انژکتور،  $\Delta P$  افت فشار انژکتور و  $C_d$  ضریب تخلیه انژکتور است. عمدتاً، در مقالات از ضریب تخلیه به‌عنوان پارامتر بی‌بعد معرف دبی انژکتور استفاده می‌شود. با توجه به رابطه بالا، دبی با مجذور افت فشار رابطه مستقیم دارد. ضریب تخلیه انژکتور پارامتر مهمی است که دبی انژکتور به آن وابسته است. این ضریب اساساً به شکل انژکتور وابسته است [۱۶]، اما نتایج برخی از تحقیقات تجربی [۱۷، ۱۸] نشان می‌دهند که افت فشار انژکتور نیز بر روی ضریب تخلیه تاثیر می‌گذارد. این تحقیقات نشان می‌دهند که ضریب تخلیه برای یک انژکتور با هندسه مشخص، با افت فشار تغییر می‌کند، به نحوی که در ابتدا، با افزایش افت فشار، افزایش می‌یابد. سپس، با افزایش بیشتر افت فشار ضریب تخلیه کاهش یافته و نهایتاً ثابت می‌شود. در این خصوص، لیبور [۱۱] هم تصریح می‌کند که از یک عدد رینولدز مشخص به بعد، ضریب تخلیه تابعی از عدد رینولدز نیست. نمودار تغییرات ضریب تخلیه

1. Dripping mode
2. Onion mode
3. Tulip mode
4. Atomization mode

۵. عدد رینولدز به‌نوعی معرف افت فشار دو سر انژکتور است، چرا که متغیر جریانی آن (سرعت) در واقع ناشی از تبدیل شدن فشار دو سر انژکتور به سرعت خروجی در نازل انژکتور است.

برحسب عدد رینولدز در شکل ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که از عدد رینولدز خاصی به بعد، ضریب تخلیه ثابت می‌ماند. برای اندازه‌گیری ضریب تخلیه انژکتور، با فرض استفاده از آب به‌عنوان سیال عامل، از رابطه (۲) استفاده شده است.

$$C_d = 1.4 \times 10^4 \times \frac{\dot{m}}{\sqrt{\Delta P}} \quad (2)$$

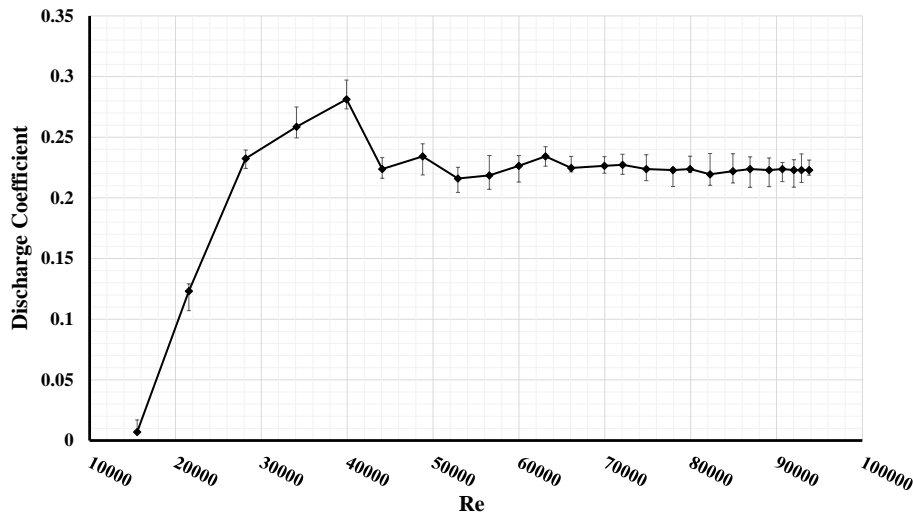


Figure 5- Discharge coefficient as a function of Reynolds number

شکل ۵- تغییرات ضریب تخلیه انژکتور برحسب عدد رینولدز

نتایج نشان می‌دهد که ضریب تخلیه این انژکتور، با افزایش رینولدز از حد  $5 \times 10^4$  تغییری نمی‌کند و در حدود  $0.23$  ثابت باقی می‌ماند. لیبور و ریزک [۱۱]، با استفاده از نتایج داده‌های تجربی، رابطه (۳) را برای محاسبه ضریب تخلیه انژکتور پیشنهاد داده‌اند. این رابطه مقدار ضریب تخلیه انژکتور حاضر را برابر با  $0.216$  تخمین می‌زند که این میزان در مقایسه با نتایج تجربی ۶ درصد خطا دارد.

$$C_d = 0.35 \left( \frac{A_p}{D_s \times d_o} \right)^{0.5} \left( \frac{D_s}{d_o} \right)^{0.25} \quad (3)$$

نتایج تجربی و تئوری نشان می‌دهند که تغییرات عدد رینولدز تغییرات زاویه پاشش را دربر دارد. در ابتدا، افزایش رینولدز باعث افزایش زاویه پاشش می‌شود، اما با افزایش بیشتر رینولدز، زمانی که مخروط پاشش به‌طور کامل شکل می‌گیرد، زاویه پاشش دیگر افزایش نمی‌یابد و ثابت می‌شود. شکل ۶ نمودار تغییرات زاویه پاشش را برحسب عدد رینولدز نشان می‌دهد. اندازه زاویه پاشش از طریق پردازش تصاویر تهیه‌شده از افشانه انژکتور مشخص شده است. از آنجایی که پردازش تصاویر در نرم‌افزار توسعه‌داده‌شده انجام شده است، خطای محاسبه کمیات مختلف (زاویه پاشش و طول شکست) بسیار ناچیز بوده و تابعی از عدد رینولدز نیست. از نتایج به‌دست آمده می‌توان رابطه‌ای به‌شکل رابطه (۴) بین تغییرات زاویه پاشش برحسب رینولدز (برحسب قطر نازل انژکتور) به‌دست آورد. عبارت ثابت رابطه (۴) تابعی از هندسه انژکتور است و برای عمومی کردن این رابطه باید اثر تغییرات مقادیر هندسی انژکتور را مطالعه کرد. شایان ذکر است که رابطه (۴) برای اعداد رینولدز بزرگ‌تر از  $2 \times 10^4$  معتبر است.

$$\theta = 67.2 \exp(-3.4 \times 10^{-7} \text{Re}) - 4078 \exp(-0.0002 \text{Re}) \quad (4)$$

تغییرات طول شکست بی‌بعد شده (نسبت به قطر نازل انژکتور) برحسب عدد رینولدز در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد، به‌جز در حالت پیازی شکل، که افزایش رینولدز طول شکست را افزایش می‌دهد، در حالت‌های دیگر، افزایش رینولدز باعث کاهش طول شکست می‌شود. در شکل ۷ طول شکست مربوط به حالت پیازی نشان داده نشده است و تنها مقادیر متناظر با حالت‌های لاله‌گون و اتمیزاسیون نشان داده شده‌اند. رابطه (۵)، براساس نتایج تجربی،

به خوبی بین طول شکست بی بعد شده و عدد رینولدز ارتباط برقرار می کند. همچون رابطه (۴)، عبارت ثابت رابطه (۵) نیز تابعی از هندسه انژکتور است و برای عمومی کردن این رابطه باید اثر تغییرات مقادیر هندسی انژکتور را مطالعه کرد. شایان ذکر است که حدود پایین و بالای اعداد رینولدز معتبر در رابطه (۴) به ترتیب برابر با  $2/5 \times 10^4$  و  $1/25 \times 10^5$  هستند.

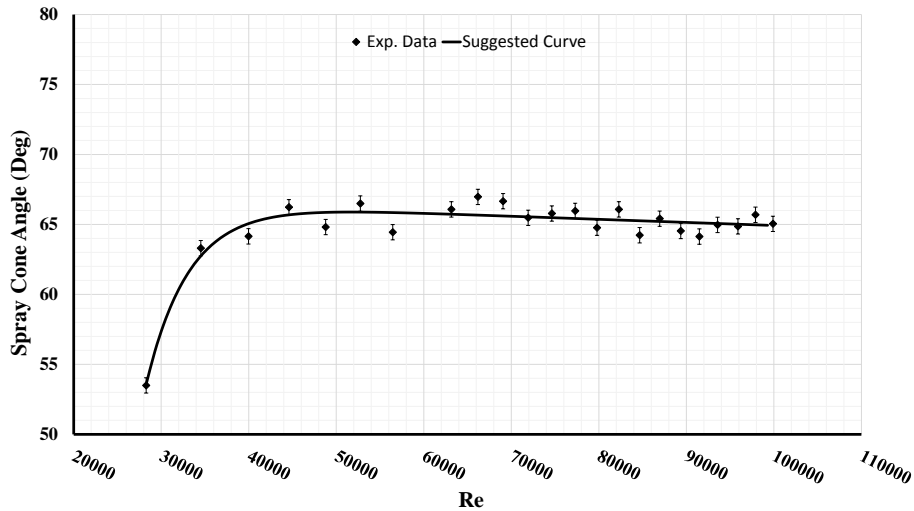


Figure 6- Spray cone angle as a function of Reynolds number  
شکل ۶- تغییرات زاویه پاشش (درجه) بر حسب عدد رینولدز

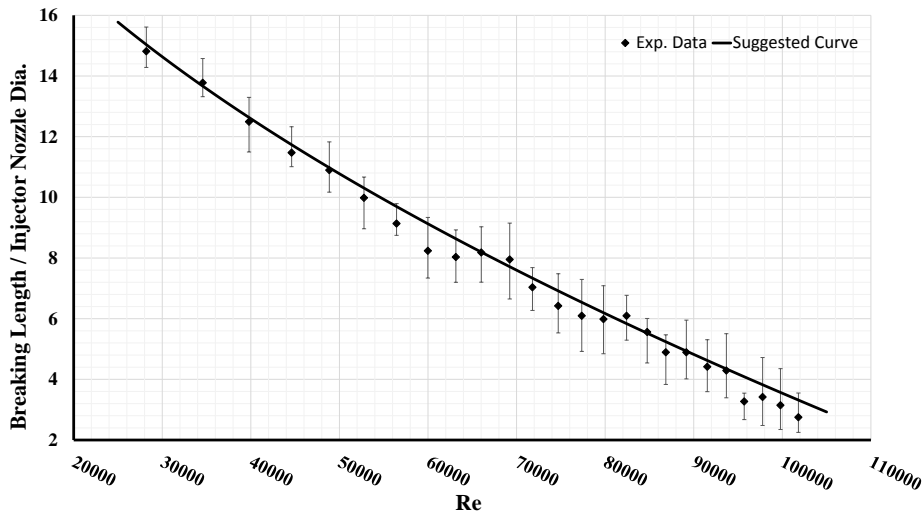


Figure 7- Dimensionless breaking length as a function of Reynolds number  
شکل ۷- تغییرات طول شکست صفحه مایع بر حسب عدد رینولدز

$$\frac{L_b}{D_{inj}} = -0.051Re^{0.534} + 26.93 \quad (5)$$

با افزایش افت فشار، سرعت نامی سیال خروجی از انژکتور طبق رابطه (۶) افزایش می یابد [۱۶]. در این رابطه،  $V$  سرعت سیال خروجی از دهانه انژکتور است. این افزایش سرعت باعث به وجود آمدن اغتشاشات قوی تر با دامنه بزرگ تر روی صفحه مایع است که باعث می شود شکست صفحه مایع پیوسته، سریع تر اتفاق بیفتد [۱۸].

$$V = \sqrt{2\Delta P/\rho} \quad (6)$$

نتایج مطالعات لغبور [۱۱] تغییرات طول شکست فن مایع (صفحه مسطح مایع) را به صورت تابعی خطی از عبارت  $We^{-0.5}Re^{0.6}$  نشان می‌دهد. این فن مایع سازوکار<sup>۱</sup> اصلی اتمیزاسیون انژکتورهای برخوردی محسوب می‌شود. لذا، می‌توان انتظار داشت که برای صفحات مایع به وجود آمده توسط انژکتورهای پیچشی نیز این وابستگی وجود داشته باشد؛ با این تفاوت که صفحات مایع انژکتورهای پیچشی مسطح نیستند. با این منطق، جهت بررسی میزان همخوانی نتایج آزمایش انژکتور منظور با نتایج یک فن مایع، تغییرات طول شکست بی‌بعد شده صفحه مخروطی این انژکتور برحسب عبارت مذکور رسم شد و مشاهده شد که همان تابعیت خطی پیشنهادی لغبور ( $We^{-0.5}Re^{0.6}$ ) برای شکست صفحه مخروطی انژکتور پیچشی نیز صادق است (به شکل ۸ مراجعه شود)، هرچند که ثابت تناسب رابطه برای صفحه مسطح انژکتور برخوردی و صفحه مخروطی انژکتور پیچشی تفاوت دارد و این مقدار به هندسه انژکتور وابسته است.

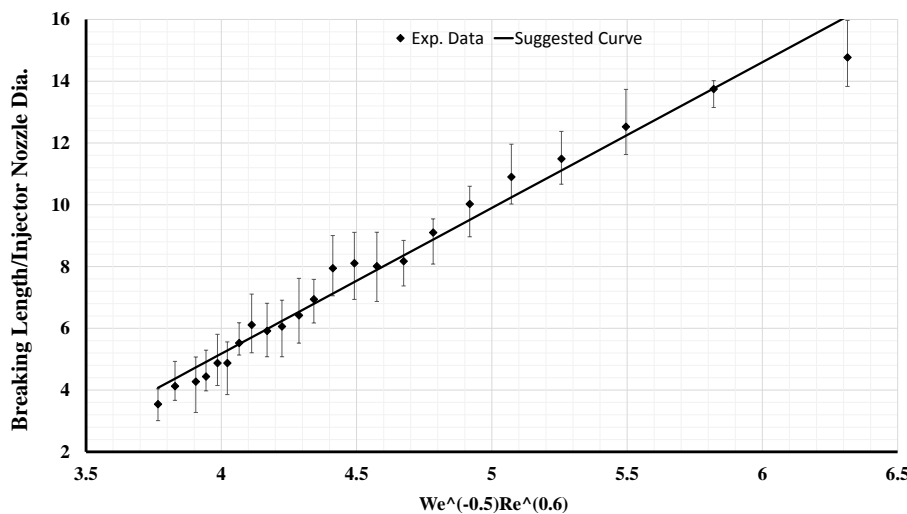


Figure 8- Dimensionless breaking length as a function of  $We^{-0.5}Re^{0.6}$   
 شکل ۸- تغییرات بی‌بعد شده طول شکست صفحه مخروطی برحسب عبارت  $We^{-0.5}Re^{0.6}$

در ادامه، نتایج حاصل از بررسی طول شکست انژکتور حاضر با نتایج یکی از مشهورترین مدل‌های ارائه شده برای تخمین طول شکست انژکتورهای پیچشی (موسوم به مدل لیسا) مقایسه می‌شود. توضیح بیش‌تر آنکه مدل لیسا، بر مبنای رشد خطی اغتشاشات ایجاد شده روی سطح مایع، طول شکست آن را تخمین می‌زند. در این روش، بر مبنای تخمین بیشینه نرخ رشد ناپایداری‌ها و طول موج متناظر، در نهایت طول شکست اولیه فواره<sup>۲</sup> مایع و قطر قطرات ناشی از اتمیزاسیون اولیه محاسبه می‌شود. رابطه (۷)، بر این مبنای طول شکست صفحه مایع را تخمین می‌زند. در این رابطه،  $V$  سرعت مطلق صفحه مایع،  $U$  سرعت نسبی مایع و گاز اطراف،  $\sigma$  کشش سطحی مایع و  $Q$  نسبت چگالی گاز به مایع است.  $J$  ثابت رابطه،  $\eta_0$  نشان‌دهنده دامنه اغتشاش روی سطح مایع و  $\eta_b$  دامنه اغتشاش در نقطه شکست است. این پارامترها براساس خواص سیال و هندسه انژکتور مشخص می‌شوند.

$$L = V \left( 3 \ln \frac{\eta_b}{\eta_0} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{J\sigma}{Q^2 U^4 \rho_l} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

نتایج آزمون‌های تجربی این انژکتور و نتایج حاصل از مدل لیسا در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که در مجموع تطابق خوبی بین نتایج تجربی و نتایج مدل لیسا وجود دارد. هر قدر که عدد رینولدز بیش‌تر می‌شود، ارزش فرض اصلی مدل لیسا (مبنی بر رشد خطی اغتشاشات) کاهش می‌یابد و ملاحظه می‌شود که انحراف نتایج آن از نتایج تجربی بیش‌تر می‌شود.

1. Mechanism  
 2. Jet



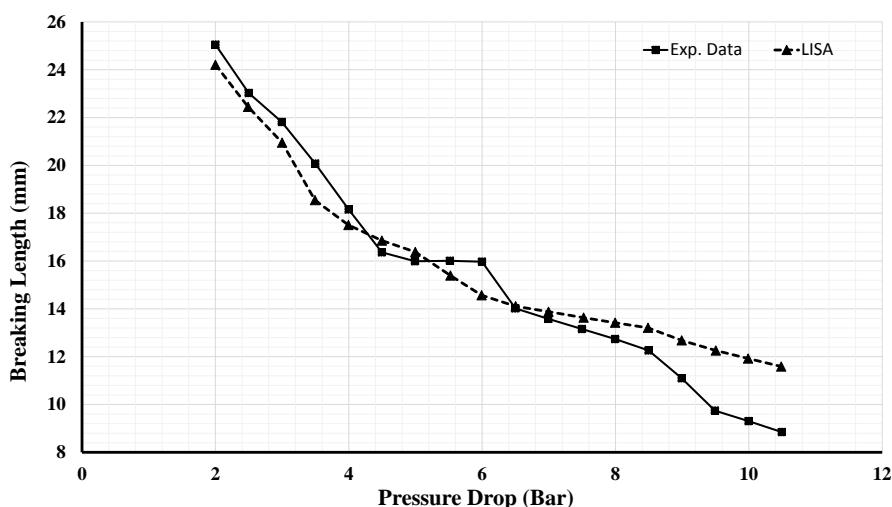


Figure 9- Breaking length resulted from experimental and LISA data

شکل ۹- تغییرات طول شکست به دست آمده آزمایش تجربی و مدل لیسا برحسب افت فشار

## نتیجه گیری

در این پژوهش، رفتار یک انژکتور پیچشی تک پایه به صورت تجربی و با استفاده از روش سایه نگاری بررسی شد. پارامترهای اندازه گیری شده در آزمایش های تجربی فشار پشت انژکتور و دبی عبوری از انژکتور بودند. ضریب تخلیه انژکتور، زاویه پاشش و طول شکست نیز مشخصاتی بودند که با استفاده از پارامترهای اندازه گیری شده و روش عکس برداری بررسی شدند.

نتایج آزمون ها نشان می دهند تغییرات عدد رینولدز باعث تغییر حالت های شکست صفحه مایع می شود. در رینولدزهای کم، ضریب تخلیه انژکتور اندکی تغییر می کند، اما از رینولدز  $5 \times 10^4$  و بالاتر ضریب تخلیه تقریباً ثابت باقی می ماند. از طرفی، زاویه مخروط پاشش، با افزایش عدد رینولدز، افزایش می یابد و در رینولدز مشخصی به بیشینه مقدار خود می رسد و با افزایش بیش تر رینولدز دیگر تغییر نمی کند.

نتایج آزمون ها حاکی از آن است که طول شکست صفحه مایع با عدد رینولدز ارتباط مستقیم دارد. در واقع افزایش رینولدز باعث افزایش سرعت سیال خروجی از انژکتور می شود و این افزایش سرعت، باعث کاهش طول شکست می شود. با افزایش بیشتر فشار پشت انژکتور، طول شکست تقریباً به صورتی خطی کاهش می یابد تا جایی که در فشارهای بالا، سیال بلافاصله بعد از خروج از انژکتور شکسته می شود که به این حالت، حالت کاملاً توسعه یافته گفته می شود. نتایج حاصل از مطالعه طول شکست صفحه مخروطی این انژکتور با نتایج مدل های ارائه شده برای شکست صفحه مسطح مقایسه و مشاهده شد که همان ارتباط خطی که بین طول شکست انژکتور و عبارت  $We^{-0.5}Re^{0.6}$  در صفحات مسطح مایع (فن) وجود دارد، برای شکست صفحه مخروطی یک انژکتور پیچشی نیز قابل تعریف است. در نهایت، نتایج مدل لیسا برای انژکتور منظور با نتایج تجربی مقایسه شد و مشاهده شد که در مجموع تطابق خوبی بین نتایج وجود دارد.

## منابع

- [1] P. G. Han, J. Seol, S. Hwang and Y. Yoon, "The Spray Characteristics of Swirl Coaxial Injectors," *AIAA Paper* 2003-0490, 2003.
- [2] S. H. Kim, Y. M. Han, S. Seo, I. Y. Moon, J. K. Kim and W. S. Seol, "Effects of LOX Post Recess on the Combustion Characteristics for Bi-Swirl Coaxial Injector," *AIAA Paper* 2005-4445, 2005.
- [3] P. A. Strakey, D. G. Talley and J. J. Hutt, "Mixing Characteristics of Coaxial Injectors at High Gas/Liquid Momentum Ratios," *J. Propul. Power*, 17, 2001, pp. 402-410.
- [4] D. Kim, J. H. Im, H. Koh and Y. Yoon, "The Effect of Ambient Gas Density on the Spray Angle And Breakup Length

- of a Swirling Liquid Sheet,” *J. Propul. Power*, 23, 2007, pp. 603-611.
- [5] D. Kim, W. Jeong, J. Im and Y. Yoon, “The Characteristics of Swirl Coaxial Injector under Varying Geometric and Environmental Conditions,” *AIAA Paper* 2004-3521, 2004.
- [6] T. Khil, Y. Chung, V. G. Bazarov and Y. Yoon, “Dynamic Characteristics of Simplex Swirl Injector in Low Frequency Range,” *Journal of Propulsion and Power*, 28, No. 2, 2012, pp. 323-333.
- [7] Y. Chung, H. Kim, S. Jeong and Y. Yoon, “Dynamic Characteristics of Open-Type Swirl Injector with Varying Geometry,” *Journal of Propulsion and Power*, 32, No. 3, 2016, pp. 583-591.
- [8] B. D. Kim and S. D. Heister, “Numerical Modeling of Hydrodynamic Instability of Swirl Coaxial Injector in a Recessed Region,” *AIAA Paper* 2006-4720, 2006.
- [9] H. Park and S. D. Heister, “Nonlinear Simulation of Free Surfaces and Atomization in Pressure Swirl Atomizers,” *Phys. Fluids*, 18, 2006, pp 1-11.
- [10] C. García, C. Pita, G. D. Martin and I. M. Hutchings, “The Shadowgraph Imaging Technique and Its Modern Application to Fluid Jets and Drops,” *Revista mexicana de física*, 57, No. 3, 2011, pp. 266-275.
- [11] A. H. Lefebvre, *Atomization and sprays*, United States of America, Hemisphere Publication, 1989.
- [12] M. H. Ziraksaz, “An Experimental Study on Fuel Atomization in Pressurized Injector,” *AIAA Paper* 2009-5405, 2009.
- [13] K. Ghorbanian, M. Ashjaee, M. R. Morad and M. R. Soltani, “Spray Characteristics of a Liquid-Liquid Coaxial Swirl Atomizer at Different Mass Flow Rates,” *Aerospace Science and Technology*, 9, No. 7, 2005, pp. 592-604.
- [14] B. S. Park, H. Y. Kim and J. T. Chung, “An Experimental Study on the Spray Characteristics of a Dual-Orifice Type Swirl Injector at Low Fuel Temperatures,” *KSME International Journal*, 18, No. 7, 2004, pp. 1187-1195.
- [15] S. Yao, *Liquid Breakup and Atomization of Pressure Jet and Swirl Atomizers*, PhD Thesis, Dept. Mech. Eng., North Carolina State University, 2013.
- [16] V. Yang, *Liquid Rocket Thrust Chambers: Aspects of Modeling, Analysis, and Design*, Reston, Virginia, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [17] J. Cousin, W. M. Ren and S. Nally, “Transient Flows in High Pressure Swirl Injectors,” *SAE Technical Paper* 980499, 1988. pp. 02-23.
- [18] M. R. Morad, *An Investigation on the Injection Domain Features of a liquid/liquid Swirl Injector with PDA sys and Nervous Network*, PhD Thesis, Dept. Aero. Eng., Sharif University of Thechnology, 2005.
- [19] I. Takao, H. Tamura and H. Sakamoto, “Characteristics of Liquid Film and Spray Injected from Swirl Coaxial Injector,” *Journal of propulsion and Power*, 19, No. 4, 2003, pp. 632-639.

## English Abstract

# An Experimental Study on the Operating Parameters of a Simplex Swirl Injector

**Ata Poormahmood, Mostafa ghorbanhosseini, Azadeh Kebriaee and Mohammad Farshchi**

Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technhlogy, Tehran, Iran

(Received: 2016.2.25, Received in revised form: 2016.6.21, Accepted: 2016.7.2)

In this paper, the operating parameters of a swirl injector were studied as a function of Reynolds number ( $Re$ ) and Weber number ( $We$ ). Spray cone angle, liquid sheet breakup length and injector discharge coefficient are the parameters which their dimensionless variations were studied to characterize the injector behavior in terms of  $Re$  and  $We$ . At the end, these experimental results were compared with those of some famous models, such as LISA. All the experiments were prformed using a simplex swirl injector. Moreover, water was used as the operating fluid sprayed in atmospheric conditions. The Shadowgraphy imaging method was used to visualize the injection spray. Experimental results show that by increasing  $Re$ , the injection regime varies from Dripping Mode to Atomization Mode at  $Re = 3 \times 10^4$ , and by further increasing  $Re$ , the fully developed mode (that creates a clear conical sheet) is achieved at  $Re = 3.7 \times 10^4$ . Also, results show that the breakup length varies with  $We^{-0.5}Re^{0.6}$  linearly. Although increasing  $Re$  initially increases the spray cone angle, but beyond a specific  $Re$ , this trend is stopped.

**Keywords:** Swirl injector, Atmospheric conditions, Reynolds number, Breakup length, Spray angle