

آزمون ذره‌سنجی یک انژکتور گریز از مرکز به کمک عکس‌برداری پرسرعت

حدیثه کریمایی^{۱*}، سید مصطفی حسینعلی‌پور^۲، فتح‌اله امی^۳، احسان موحدنژاد^۴ و رضا شریف‌زاده^۵

۱ و ۳- پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

۴- شرکت مهندسی و ساخت توربین مینا (توگا)

۵- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

*تهران، کدپستی: ۱۴۶۵۷۷۴۱۱۱

karimaei@ari.ac.ir

در این مقاله، به منظور بررسی ناپایداری سطح لایه سیال خروجی از انژکتور و به‌دست آوردن مشخصه‌های اصلی میکروسکوپی اسپری، یک انژکتور گریز از مرکز مورد آزمون تجربی قرار داده شد. این انژکتور از نوع جریان چرخشی می‌باشد و حین کارکرد، یک حفره هوا در مرکز انژکتور شکل می‌گیرد. بنابراین انژکتوری یک پایه اما با عملکرد دوفازی بوده و از این‌رو چتر پاششی به صورت یک مخروط توخالی ایجاد می‌نماید. انژکتوری که مورد آزمون قرار گرفته است قبلاً در مرحله آزمون‌های عملکردی (ماکروسکوپی) تأیید شده است. از آنجاکه تجهیزات لیزر داپلر برای اندازه‌گیری مشخصات اسپری، دارای تکنولوژی پیشرفته و قیمت بسیار بالایی است، در مراکز تحقیقاتی داخل کشور در دسترس نمی‌باشد. از این‌رو تلاش شده است تا حد ممکن، این مشخصات و همچنین ناپایداری سطح لایه سیال به کمک عکس‌برداری بررسی شود. لایه سیال خروجی از انژکتور دارای نوساناتی بر روی سطح است که از داخل انژکتور نشأت می‌گیرد. این نوسانات در اثر تقابلات آیرودینامیکی رشد کرده و در نهایت منجر به شکست لایه سیال و شکل‌گیری لیگامنت‌ها می‌شود. طول شکست نیز از تصاویر ثبت شده قابل اندازه‌گیری است. به کمک عکس‌برداری با دوربین پرسرعت، حرکت امواج ناپایدار بر روی لایه سیال خروجی از انژکتور و رشد آنها به خوبی دنبال شده است. همچنین، لیگامنت‌ها در ناحیه شکست اولیه و تشکیل قطرات بلافاصله پس از شکست اولیه نشان داده شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: انژکتور گریز از مرکز، دستگاه تست اسپری، مخروط اسپری، ناپایداری لایه سیال

علائم و اختصارات

2α	زاویه رأس مخروط اسپری
fps	فریم بر ثانیه
PIVLAB	نام نرم‌افزار
PDPA	سیستم اندازه‌گیری سایز و سرعت ذرات
h_s	نصف ضخامت لایه سیال خروجی از انژکتور
k_s	عدد موج متناظر با ماکزیمم نرخ رشد موج
d_L	قطر لیگامنت

Δp

اختلاف فشار دو طرف انژکتور

۱. استادیار (نویسنده مخاطب)

۲. استاد

۳. دانشیار

۴. فارغ‌التحصیل دکتری

۵. دانشجوی کارشناسی ارشد

مقدمه

فرایند قطره‌سازی^۶ (اتمیزاسیون) را می‌توان فرایندی که در آن حجمی از مایع به تعداد زیاد قطره تبدیل می‌شود، تعریف کرد. یکی از زمینه‌های مهم استفاده از فرایند اتمیزاسیون در موتورهای موشک سوخت مایع برای سوخت و اکسیدکننده مایع می‌باشد. در این کاربرد از یک نوع انژکتور جریان پیچشی برای پاشش سوخت و اکسیدکننده استفاده می‌شود. در انژکتورهای جریان پیچشی، مایع داخل انژکتور حول محور آن، مومنتوم زاویه‌ای می‌گیرد. این انژکتورها یک اسپری به صورت لایه سیال^۷ که به علت چرخش اولیه بطور شعاعی پخش می‌شود، را تولید می‌کنند. این نوع انژکتورها نسبت به دیگر انژکتورها دارای اتمیزاسیون با اندازه ریزتری هستند. در مرحله تشکیل قطرات، تکه‌های کوچک سیال از ناحیه سطح مشترک مایع-گاز جدا شده و تولید قطرات می‌کنند. امواج ناپایدار موجب جدا شدن تکه‌هایی به نام لیگامنت^۸ از لبه لایه سیال می‌شوند که خود در اثر افزایش ناپایداری به علت نیروهای آترویدینامیکی به قطرات ریزتر می‌شکنند [۱]. بعضی از مشخصات ماکروسکوپی یک اسپری نظیر طول شکست و اندازه لیگامنت‌ها، به عنوان ورودی‌هایی برای مدل‌های مختلف اسپری لازم هستند. از این‌رو، تعیین این پارامترها دارای اهمیت می‌باشد. علاوه بر آن، به دلیل اهمیت طول محفظه احتراق و محدودیت‌های آن، آگاهی از طول شکست اسپری مهم می‌باشد.

برتومی^۹ و همکاران در سال ۲۰۰۱ [۲] با استفاده از تکنیک تصویربرداری، به توصیف شکست لایه سیال حلقوی و صفحه‌ای پرداختند. آنها نشان دادند که در لایه سیال حلقوی بدون حضور جریان هوا، اثرات کشش سطحی تمایل به بستن استوانه سیال دارد. فرایند شکل‌گیری حفره هوا و توسعه آن با زمان درون یک انژکتور با دو ورودی مماسی به صورت تجربی و عددی توسط دس^{۱۰} و همکاران [۳] مطالعه شد. آزمایشاتی که توسط آنها انجام شد به کمک انژکتورهای شیشه‌ای و آب به عنوان سیال کاری بود. آنها به کمک این آزمایش توانستند ستون گاز را درون انژکتور مشاهده کنند و امواج سطحی روی سطح مشترک سیال و گاز را درون نازل انژکتور به کمک استروبوکوپ مشاهده کنند. در سال ۲۰۰۲، سلام^{۱۱} و همکاران [۴] شکست اولیه توربولانسی جت را به کمک روش‌های تجربی مورد بررسی قرار داد. آنها با در نظر گرفتن اسپری

در محیط با فشار و چگالی پایین و صرفنظر از تأثیر نیروهای آترویدینامیکی محیط، پارامتر توربولانس را به طور مجزا از دیگر پارامترها و به عنوان یک عامل مستقل بررسی کردند. نتایج تجربی آنها کمک شایان ذکری به فهم فیزیکی نحوه تأثیر توربولانس و ناپایداری‌های هیدرویدینامیکی روی سطح جت سیال می‌کند. کارهای مشابهی نیز قبل از او توسط وو^{۱۲} و فائس^{۱۳} [۵] انجام شده بود. آنها تلاش کردند تا مکانیزم شکست اولیه جت و تشکیل قطرات را به کمک روش‌های مشاهده‌ای بررسی کنند. بنابراین، جریان سیال را به کمک روش‌های عکس‌برداری مشاهده کردند. با استفاده از این روش، طول شکست ستون سیال، موقعیت تشکیل قطرات، اندازه قطرات و سرعت سطح جت و قطرات اندازه‌گیری شد. پارک^{۱۴} و لی^{۱۵} [۶] و ونگ^{۱۶} [۷] با استفاده از سیستم PDPA^{۱۷}، سرعت و قطر قطرات اسپری را اندازه‌گیری کردند. همچنین نقید^{۱۸} و همکاران [۸] روی شکست لایه مایع، مطالعه تجربی انجام دادند و اثرات شکل انژکتور و فشار اسپری را بر مشخصه‌های لایه مایع بررسی کردند. جزایری و لی [۹]، پایداری و شکست غیرخطی یک لایه سیال صفحه‌ای را با ایجاد اغتشاش به روش تجربی بررسی کردند. عکس‌برداری آنها با استفاده از سنکرون کردن استروبوکوپ و دوربین انجام شده بود. در سال ۲۰۱۴، حسینی پور و همکاران [۱۰] طراحی، شبیه‌سازی و تست یک انژکتور گریز از مرکز را انجام دادند و نشان دادند که نتایج شبیه‌سازی با تست منطبق است. همچنین، حسینی پور و همکاران در سال‌های ۲۰۱۴ [۱۱] و ۲۰۱۶ [۱۲] در مطالعات دیگری، برای چند نمونه انژکتور ساخته شده از یک نقشه، تست‌های ماکروسکوپی (از حیث یکنواختی، تقارن و توزیع محیطی مناسب اسپری) انجام دادند و در نهایت یک انژکتور را از میان نمونه‌هایی که ساخته بودند، به عنوان انژکتور منتخب برگزیدند و ادعا نمودند برای انجام تست‌های ذره‌سنجی، مورد تأیید است.

در پژوهش حاضر، یک انژکتور گریز از مرکز با ورودی‌های مماسی که بر اساس روش بایول^{۱۹} [۱۳] طراحی شده است و پس از ساخت مورد آزمون قرار گرفت. این انژکتور از میان پنج نمونه یکسان ساخته شده از یک نقشه و با انجام تست‌های عملکرد انتخاب شد [۱۲]. از این‌رو، این انژکتور برای انجام تست‌های ذره‌سنجی^{۲۰} مناسب تشخیص داده شد و در این مقاله نتایج این

12. Wu

13. Faeth

14. Park

15. Li

16. Hwang

17. Phase Doppler Particle Anemometry

18. Negeed

19. Bayvel

20. Microscopic

6. Atomization

7. Liquid sheet

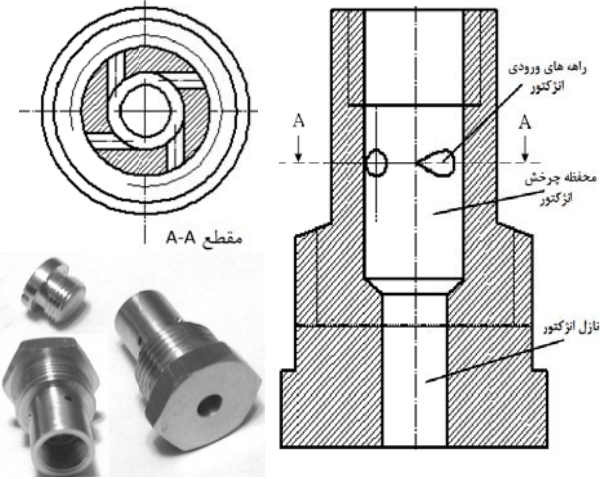
8. Ligament

9. Berthoumieu

10. Dash

11. Salam

این نوع انژکتور به عنوان انژکتور اکسیدکننده^{۲۱} در محفظه احتراق راکت‌های سوخت مایع رایج است. به منظور سهولت و ایمنی در انجام آزمون‌های سرد، همواره از آب استفاده می‌شود.



شکل ۱- شماتیک انژکتور طراحی شده به همراه دو نمای متفاوت یک نمونه از انژکتور ساخته شده به همراه پیچ آب‌بند انتهایی

جدول ۱ - ابعاد مهم انژکتور

پارامتر	مقدار
طول مجراهای ورودی	۲/۷ میلی‌متر
قطر مجراهای ورودی	۱/۲۷ میلی‌متر
طول نازل خروجی	۸ میلی‌متر
قطر نازل خروجی	۴ میلی‌متر

دستگاه تست انژکتور

دستگاه تست اتمیزاسیون از پنج مجموعه اصلی شامل سامانه تغذیه مایع (آب)، سامانه هوای تحت فشار، انژکتور و صفحه انژکتور، ظرف جمع‌کننده مایع و سامانه عکس‌برداری تشکیل شده است. خط تغذیه مایع (آب شهری) علاوه بر مخزن مایع، دارای فیلتر و پمپ فشار بالا نیز می‌باشد. همچنین، از یک منبع ذخیره دیگر از جنس استیل به عنوان منبع تحت فشار استفاده می‌شود. یک کپسول نیتروژن با فشار بالا نیز برای تأمین فشار منبع ذخیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. تصویر دستگاه آزمایش در شکل (۲) نشان داده شده است. در این شکل، انژکتور بر روی صفحه انژکتور نصب شده است. کنترل پاشش براساس تنظیم فشار و سپس باز نمودن شیر کنترل انجام می‌گیرد. شکل (۳) شماتیک دیاگرام چرخش جریان سیال

تست‌های ذره‌سنجی ارائه می‌شود. مقاله حاضر یک مقاله کاربردی در تست انژکتور می‌باشد که موضوعات مورد بحث آن در زمینه تصویربرداری از امواج سطحی لایه سیال، لیگامنت‌ها و قطرات در مراجع داخل ایران قبلاً منتشر نشده است. این مقاله می‌تواند کمک خوبی برای محققان داخلی فعال در حوزه اسپری باشد. با توجه به فقدان امکانات کافی در دانشگاه‌های داخل کشور برای انجام تست‌های اسپری، آزمون‌هایی که انجام می‌شوند مطمئناً دارای نواقصی خواهد بود. از مهمترین ابزارها برای انجام یک تست بی‌نقص اسپری، داشتن دستگاه لیزر داپلر است که حال حاضر در دانشگاه‌های ایران موجود نیست.

پس از مقدمه، ابتدا مشخصات انژکتور مورد مطالعه ارائه می‌شود. سپس، روش آزمون ذره‌سنجی و دستگاه تست انژکتور بحث می‌شود. پس از آن نتایج حاصل از عکس‌برداری پرسرعت شامل اندازه‌گیری طول شکست، زاویه مخروط اسپری، بررسی شکست اولیه لایه سیال، تشکیل لیگامنت‌ها، شکست ثانویه، تشکیل قطرات، تخمین سرعت میانگین لایه، طول موج سطحی لایه و نهایتاً جمع‌بندی ارائه می‌شود.

مشخصات انژکتور مورد مطالعه

این انژکتور یک پایه می‌باشد یعنی فقط یک نوع سیال کاری می‌تواند به آن ورود کند، اما عملکرد آن به دلیل تشکیل حفره هوا درون آن به صورت دوفازی است. این انژکتور دارای دبی جرمی 0.06 kg/s در اختلاف فشار $4/5$ بار مطلق با زاویه مخروط اسپری 100° درجه می‌باشد. شماتیک آن در نرم‌افزار سالدورک به صورت شکل (۱) ترسیم شده است. در این شکل، تصویری از انژکتور ساخته شده به همراه پیچ آب‌بند انتهایی آن قابل مشاهده می‌باشد. در جدول (۱) ابعاد مهم این انژکتور، ارائه شده‌اند.

آزمون ذره‌سنجی

روش بررسی

آزمون انژکتورها در آزمایشگاه پیشرانس دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. پارامترهای اصلی در آزمون‌های ذره‌سنجی انژکتور عبارتند از [۱۳، ۱۴]:

- ✓ اختلاف فشار دو طرف انژکتور (Δp)
- ✓ زاویه رأس مخروط اسپری (2α)
- ✓ طول شکست اسپری
- ✓ اندازه قطر و سرعت قطرات

کاری را نشان می‌دهد که به کمک آن نحوه ارتباط تجهیزات تست را می‌توان دریافت.

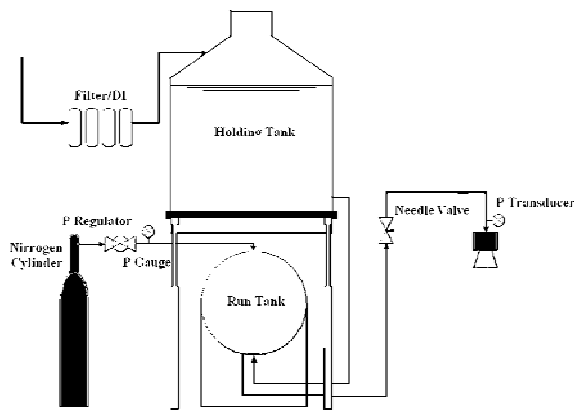


شکل ۲- تصویر دستگاه آزمون پاشش

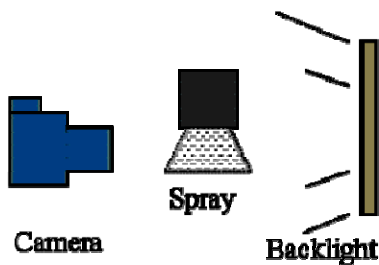
است. این عکس‌برداری در مقاطع مختلف اسپری به صورت نمای بسته انجام شده است. مقاطع مختلف اسپری شامل لایه سیال خروجی از انژکتور، ناحیه شکست اولیه، ناحیه تشکیل لیگامنت‌ها، ناحیه تشکیل قطرات اولیه و ثانویه است. شاخصه‌های اصلی اسپری را می‌توان از این تصاویر استخراج نمود. دوربین فوق قابلیت عکس‌برداری با سرعتی تا ۴۰۰۰۰ فریم بر ثانیه^{۲۳} را دارد و زمان پرتوگیری^{۲۴} آن تا ۵۰ نانوثانیه قابل کوتاه کردن است. هر چه ابعاد عکس (تعداد پیکسل در یک تصویر) کاهش داده شود، می‌توان سرعت عکس‌برداری (بر حسب فریم بر ثانیه) را بالاتر برد. از این‌رو در انجام آزمایش‌ها، عکس‌برداری در محدوده سرعت ۵۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ فریم بر ثانیه انجام شده است تا بتوان ابعاد تصویر بزرگتری داشت. در خصوص دقت خواندن داده‌های آزمایش نیز باید خاطرنشان کرد که دقت خواندن فشار در این آزمایش ± 0.1 بار است، دقت خط کش ± 1 میلی‌متر و دقت خواندن زاویه ± 1 درجه می‌باشد.



شکل ۴- دوربین سرعت بالای استفاده شده متعلق به شرکت PCO



شکل ۳- شماتیک دیاگرام چرخش جریان سیال کاری



شکل ۵- شماتیک سیستم عکس‌برداری

نتایج

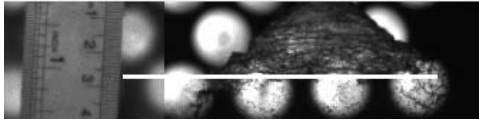
شکل (۶) نمونه‌هایی از تصاویر ثبت شده در چند مرحله متوالی را نشان می‌دهد که با سرعت ۴۸۸۰ فریم بر ثانیه گرفته شده‌اند. مخروط اسپری، امواج سطح مخروط اسپری، ناحیه شکست اولیه و مراحل متلاشی شدن لایه سیال در آن ناحیه، در این تصاویر متوالی قابل مشاهده هستند.

تشریح مراحل تست انژکتور

آزمایش با تغییر دادن فشار پشت انژکتور (توسط شیر تنظیم کپسول نیتروژن) و در نتیجه تغییر یافتن دبی جرمی سیال ورودی انجام می‌شود. لازم به یادآوری است، انژکتوری که آزمون‌ها بر روی آن انجام گرفت قبلاً به کمک مراحل تعیین مشخصه انژکتور تأیید شده بود [۱۲]. در مراحل این آزمایش، با تنظیم شرایط مورد نظر که اعمال فشار $3/5$ بار نسبی (معادل $4/5$ بار مطلق) پشت انژکتور است. همچنین، تعداد زیادی عکس با فاصله زمانی بسیار اندک (از مرتبه میکروثانیه)، به وسیله سامانه عکس‌برداری نشان داده شده در شکل (۴) براساس چیدمان شکل (۵) یعنی با منبع نور پستی^{۲۳} (که توان هر لامپ LED برابر یک وات است)، از اسپری گرفته شده

23. fps
24. Exposure Time

22. Back Light

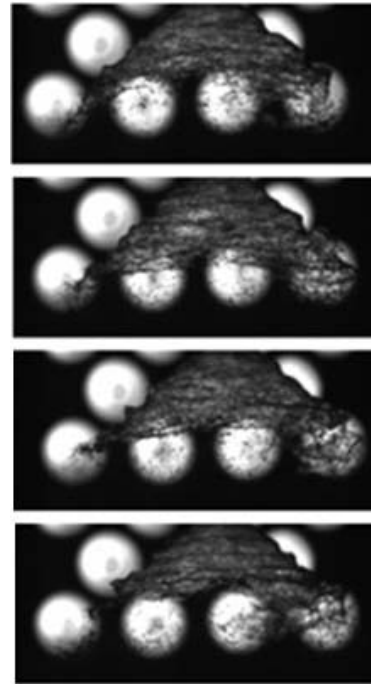


شکل ۸- اندازه‌گیری طول شکست اولیه

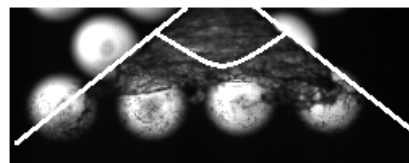
در آزمون‌های ذره‌سنجی، هدف اصلی به‌دست آوردن قطر و سرعت قطرات و میزان فراوانی بر حسب طیف قطر و سرعت آنهاست. در مراحل انجام این آزمون، تلاش زیادی صورت گرفت تا بتوان به کمک عکس‌برداری تخمینی از اندازه قطرات ارائه کرد، اما موفقیت‌چندانی در رابطه به‌دست نیامد. در واقع، به‌دست آوردن تخمینی از اندازه و سرعت قطرات و توزیع آنها نیازمند تجهیزاتی نظیر PDPA است که متأسفانه به دلیل عدم وجود این سامانه در ایران، امکان به‌دست آوردن توزیع قطر و سرعت قطرات برای انژکتور طراحی شده، فراهم نشد. در خصوص عکس‌برداری نیز باید گفت که به علت بحث عمق میدان دید، هیچ‌گاه نمی‌توان با عکس‌برداری تخمینی از اندازه جمع زیادی از قطرات به‌دست آورد. زیرا، قطرات در صفحات متفاوتی (عمق متفاوت میدان دید لنز دوربین) واقع می‌باشند. تصاویر فراوانی در محدوده شکست اولیه، پایین دست شکست اولیه، ناحیه شکست ثانویه و غیره از قطرات و لیگامنت‌ها گرفته شد که به دلیل اشکالات مطرح شده، امکان وضوح همه قطرات در یک تصویر وجود ندارد. در واقع، زمانی این روش می‌توانست موفق باشد که تعداد قطرات محدودی برای بررسی تولید می‌شدند. لازم به ذکر است که یکسان بودن قطر قطرات در مورد این نوع انژکتور مطرح نمی‌باشد و عموماً انژکتورهای جریان چرخشی از حیث سایز و سرعت قطرات دارای طیفی در حدود ۳ برابر اندازه میانگین قطرات هستند [۱۵].

نمونه‌ای از تصاویری که تهیه و به صورت شکل‌های (۹) و (۱۰) ارائه شده‌اند که در آنها لیگامنت‌ها و قطرات به ترتیب در ناحیه شکست اولیه و در پایین دست ناحیه شکست اولیه به چشم می‌خورند. این تصاویر با زمان پرتوگیری ۵ میکروثانیه و با عکس‌برداری ۵۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ فریم بر ثانیه گرفته شده‌اند. علت شکل‌گیری لیگامنت‌ها قابل مشاهده در شکل (۹) این است که در اثر تقابل نیروهای آیرودینامیکی که روی لایه سیال وارد می‌شوند و نیروهای کشش سطحی سیال، نهایتاً لایه سیال در یک فاصله‌ای از دهانه خروجی انژکتور گسسته می‌شود و به تکه‌های استوانه‌ای شکلی به نام لیگامنت خرد می‌شود. در شکل (۱۰)، قطرات بلافاصله پس از خرد شدن لیگامنت‌ها نشان داده شده‌اند. چون اندازه این قطرات از اندازه یک پیکسل تصویر کوچکتر است، این امکان فراهم نشد که موفقیتی در پردازش تصویر به کمک نرم‌افزار PIVLAB به‌منظور اندازه‌گیری قطر قطرات به‌دست آید و تنها سرعت قطرات قابل اندازه‌گیری بود.

زاویه رأس مخروط اسپری از این شکل‌ها نظیر شکل (۷) قابل اندازه‌گیری است که برابر با ۱۰۱ درجه اندازه‌گیری شده است. به طور معمول، اسپری‌های مخروطی توخالی دارای زاویه پاشش بیش از ۶۰ درجه هستند. البته، پارامترهای هندسی ساختار داخل انژکتور و اختلاف فشار دو سر آن، در مقدار زاویه پاشش تعیین‌کننده هستند. هرچند که اختلاف فشار بیشتر در دو سر انژکتور منجر به زاویه بازتر پاشش خواهد شد، اما این افزایش تا یک حدی است. زیرا، وقتی اختلاف فشار از یک مقدار معینی بیشتر شود، دیگر دبی جرمی تغییر نخواهد کرد و مقدار زاویه پاشش ثابت خواهد ماند. برای اندازه‌گیری طول شکست اسپری، مطابق با شکل (۸)، از یک خط‌کش که نقطه صفر آن دقیقاً در دهانه خروجی انژکتور قرار داده شده، استفاده می‌شود تا بتوان مقیاس تصاویر را به کمک آن مشخص کرد. طول شکست اولیه تقریباً برابر با ۲۸ میلی‌متر اندازه‌گیری شد که با اعمال اختلاف فشار ۳/۵ بار نسبی (یا ۴/۵ بار مطلق) در دو سر انژکتور به‌دست آمده است. ناحیه شکست اولیه، ناحیه‌ای است که در آن لایه سیال تجزیه شده و به لیگامنت‌ها شکسته می‌شود و بلافاصله پس از آن، لیگامنت‌ها به قطرات اولیه خرد می‌شوند.



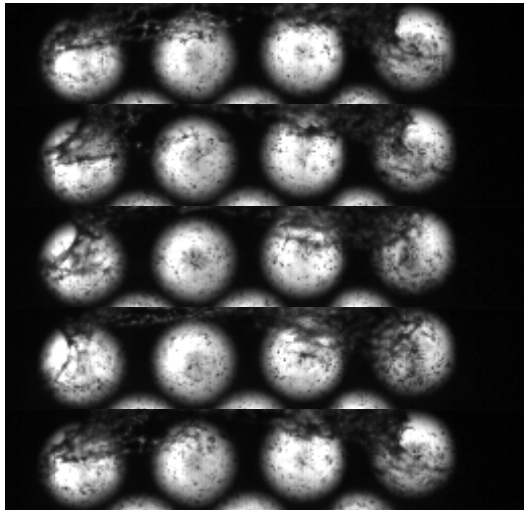
شکل ۶- تصاویر متوالی از شکل کلی اسپری با ۴۸۸۰ فریم بر ثانیه



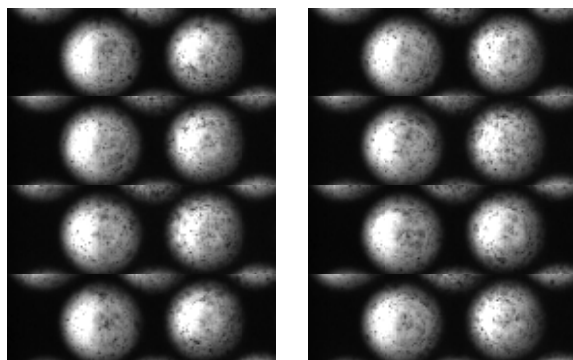
شکل ۷- اندازه‌گیری زاویه مخروط پاشش

$$d_L = \sqrt{\left(\frac{8h_s}{k_s}\right)} \quad (1)$$

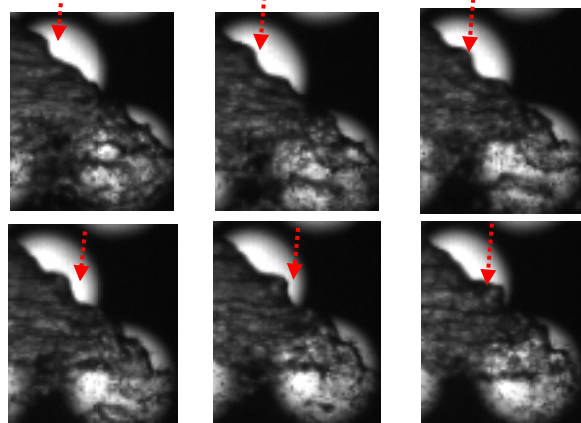
که در آن h_s نصف ضخامت لایه سیال خروجی از انژکتور و k_s عدد موج متناظر با ماکزیمم نرخ رشد موج است. بر این اساس، مقدار اندازه لیگامنت در حدود ۵۰۰ میکرون محاسبه شد.



شکل ۹- لیگامنت‌ها در تصاویر متوالی در ناحیه شکست اولیه



شکل ۱۰- تصاویر متوالی پایین دست شکست اولیه- حضور قطرات اولیه

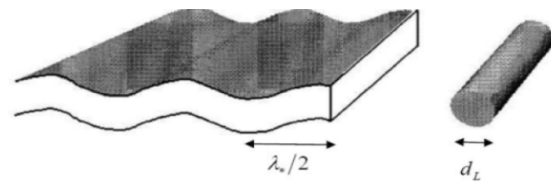


شکل ۱۱- تصاویر متوالی حرکت موج ناپایدار روی لایه سیال خروجی

سرعت میانگین قطرات معادل ۱۰/۸۵ متر بر ثانیه بوده که با استفاده از نرم‌افزار PIVLAB به‌دست آمد. نحوه کارکرد این نرم‌افزار بدین صورت است که تصاویرهای متوالی (در اینجا ۲۰ تصویر متوالی) به نرم‌افزار داده می‌شود و نرم‌افزار با تعقیب ذره‌ها در تصاویرهای متوالی، تخمینی از سرعت آنها به‌دست می‌آورد. میانگین سرعت ذکر شده نیز میانگین سرعت تعداد بسیار زیادی ذره است که در موقعیت‌های مختلفی در عرض میدان اسپری و درست بلافاصله بعد از شکست اولیه توسط نرم‌افزار مذکور تعقیب شده‌اند. سرعت اندازه‌گیری شده ناشی از دو مؤلفه عمودی (در راستای محور اسپری) و عرضی (در راستای عرضی و عمود بر محور اسپری) می‌باشد. آزمون در شرایط اختلاف فشار ۳/۵ بار نسبی در دو سر انژکتور انجام گرفته است.

به منظور بررسی تکرارپذیری نتایج، هر آزمون با سه مرتبه تکرار انجام شد. بدین صورت که تست کاملاً متوقف می‌شود. سپس، مجدداً شرایط حاکم فشار تنظیم و تزریق سیال انجام و داده‌ها ثبت می‌شوند. پارامترهای اندازه‌گیری شده نظیر زاویه لایه سیال خروجی اسپری و سرعت میانگین نیز از میانگین‌گیری سه مرتبه تکرار آزمایش حاصل شده‌اند. همچنین، در یک مرحله قبل از انجام آزمایش از نقشه انژکتور پنج نمونه ساخته شد و با انجام آزمون‌های تعیین مشخصه انژکتور، انژکتور مناسب از میان آنها انتخاب شد که برای آزمون فعلی از همان انژکتور منتخب استفاده شد. طریقه انتخاب این انژکتور منتخب در مرجع [۱۱] موجود است.

به کمک تعدادی از تصاویر ثبت شده، امواجی که بر روی لایه سیال قبل از شکست رشد کرده‌اند و عامل اصلی شکست لایه هستند، قابل مشاهده می‌باشند. در شکل (۱۱) تصاویر متوالی از حرکت امواج روی لایه سیال خروجی از انژکتور نشان داده شده است. این امواج با طی مسیر، همانگونه که قبلاً بیان شد در اثر تقابلات آیرودینامیکی رشد کرده و پس از رسیدن دامنه آن‌ها به یک حد مشخص منجر به فروپاشی لایه سیال، کنده شدن تکه‌های سیال به نام لیگامنت و بدین ترتیب شکل‌گیری ناحیه شکست اولیه می‌شود. منشأ ایجاد این نوسانات روی لایه سیال در واقع از داخل انژکتور بوده است که به محض حذف شرط مرزی دیواره و برقراری سطح مشترک سیال با هوا، این نوسانات تقویت می‌شوند. علت اصلی ایجاد این نوسان‌ها توربولانس بودن جریان درون انژکتور است. زیرا، جریان چرخشی بسیار قوی با رینولدز بالا درون انژکتور وجود دارد. طول موج و دامنه این موج سطحی به کمک پردازش تصویر قابل تخمین زدن است. طول موج این موج ناپایدار که بر روی لایه سیال در حال رشد کردن است و به صورت مستقیم با اندازه لیگامنت‌ها رابطه دارد. هر طول موج از لایه سیال، مطابق شماتیک شکل (۱۲) به دو لیگامنت شکسته می‌شود. قطر لیگامنت به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:



شکل ۱۲- شکست لایه سیال و تشکیل لیگامنت

نتیجه‌گیری

از آنجاکه همواره جهت صحه‌گذاری نتایج یک مدل‌سازی به مشخصات یک انژکتور واقعی نیاز است، در این پژوهش یک انژکتور گریز از مرکز یک‌پایه (با عملکرد دوفازی) مورد آزمایش قرار گرفت. کاربرد این نوع انژکتورها در موتورهای توربین گاز، دیگ‌های صنعتی و مخصوصاً راکت‌های سوخت مایع است. به منظور سهولت و ایمنی در انجام آزمون‌های سرد، همواره از آب استفاده می‌شود.

در انژکتور مورد مطالعه در پژوهش حاضر، زاویه پاشش از آزمون معادل ۱۰۱ درجه و طول شکست اولیه اسپری معادل ۲۸ میلی‌متر به‌دست آمد. به کمک عکس‌برداری با دوربین پرسرعت، حرکت امواج ناپایدار بر روی لایه سیال خروجی از انژکتور به خوبی دنبال شد. همچنین، لیگامنت‌ها در ناحیه شکست اولیه و تشکیل قطرات بلافاصله پس از شکست اولیه نشان داده شدند. از آنجا که تجهیزات PDPA برای اندازه‌گیری مشخصات اسپری، دارای فناوری پیشرفته و قیمت بسیار بالایی است، در مراکز تحقیقاتی داخل کشور در دسترس نیست. از این‌رو، تلاش شد تا به کمک عکس‌برداری پرسرعت تا حد ممکن، مشخصات اسپری و ناپایداری سطح لایه سیال بررسی و تخمینی از اندازه لیگامنت و سرعت میانگین آنها به‌دست آورده شود.

مراجع

- Entry," *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 123, No.4, 2001, pp. 829-835.
- [4] Sallam, K.A., Dai, Z. and Faeth, G.M., "Liquid Breakup at the Surface of Turbulent Round Liquid Jets in Still Gases," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 28, No. 3, 2002, pp. 427-449.
- [5] Wu, P.K. and Faeth, G.M., "Onset and End of Drop Formation Along the Surface of Turbulent Liquid Jets in Still Gases," *Phys. Fluids*, Vol. 7, No. 11, 1995, 2915-2917.
- [6] Park, S. W. and Lee, C. S., "Macroscopic structure and Atomization Characteristics of High-Speed Diesel Spray," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 4, No. 4, 2003, pp. 157-164.
- [7] Hwang, J.S., Ha, J.S. and No, S.Y., "Spray Characteristics of DME in Conditions of Common Rail Injection System (II)," *Int. J. Automotive Technology*, Vol. 4, No. 3, 2003, pp. 119-124.
- [8] El-Sayed Negeed, R., Hidaka, S., Kohno, M. and Takata, Y., "Experimental and Analytical Investigation of Liquid Sheet Breakup Characteristics," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 32, No. 1, 2011, pp. 95-106.
- [9] Jazayeri, S.A. and Xianguo, Li., "Nonlinear Instability of Plane Liquid Sheets," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 40, No. 6, 2000, pp. 281-308.
- [10] Hosseinalipour, S.M., Karimaei, H. and Ommi, F., "Design, Numerical Simulation and Experiment of a Swirl Injector with Tangential Inlets," *Journal of Fuel and Combustion*, Vol. 7, No. 2, 2014, pp.97-110 (in persian).
- [11] Hosseinalipour, S.M., Karimaei, H. and Ommi, F., "Experimental Characterization of a Swirl Injector with Tangential Inlets," *Modares Mechanic Journal*, Vol. 14, No. 10, 2014, pp.59-62 (in persian).
- [12] Hosseinalipour, S.M., Karimaei, H. and Ommi, F., "Experimental Analysis of the Spray Characteristics of a Swirl Injector," *Tabriz University Mechanic Journal*, Vol. 46, No. 4, 2016, pp.69-75 (in persian).
- [13] Bayvel, L. and Orzechovski, Z., *liquid atomization*, 1st Ed., Taylor & Francis, 1993, pp.105-115.
- [14] Ommi, F., *Space Propulsion and Rocket*, 1st Ed., Besat Publication, 2009, pp.76-88 (in persian).
- [15] Karimaei, H., *Prediction of Droplet Size and Velocity Distributions Using Maximum Entropy Model by Coupling of Atomization Stages*, (PhD Thesis), Iran University of Science and Thechnology, Iran, 2016, pp.170-173 (in persian).
- [1] Hosseinalipour, S.M. and Karimaei, H., "Prediction of Air Core and Injection Angle of a Swirl Injector using 3D Analysis," *2nd Proceeding of Gas Turbine*, Iran, Tehran, 2012, pp. 25-32 (in persian).
- [2] Berthoumieu, P. and Lavergne, G., "Video Techniques Applied to the Characterization of Liquid Sheet Breakup," *Journal of Visualization*, Vol. 4, No.3, 2001, pp. 267-275.
- [3] Dash, S.K., Halder M.R., Peric M. and Som S.K., "Formation of Aircore in Nozzles With Tangential