

بررسی تجربی و تحلیلی مشخصه‌های عملکردی یک انژکتور

فشاری - پیچشی سوخت سنگین

پوریا میکانیکی^۱، سید محمدعلی نجفی^۲ و حجت قاسمی^۳

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۲۰)

چکیده

در این پژوهش، یک مدل از انژکتورهای فشاری-پیچشی برای سیالی با لزجت زیاد طراحی و ساخته شده است. این پژوهش به مطالعه تاثیر فشار و لزجت بر مشخصه‌های عملکردی انژکتور می‌پردازد. این موارد شامل دبی، ضریب تخلیه، طول شکست، نیم زاویه مخروطی، توزیع دبی فضایی پاشش و میانگین قطر قطرات می‌باشد و تغییرات آن‌ها به صورت تابعی از اعداد رینولدز و وبر بیان شده است. از مازوت و آب که دارای اختلاف ویسکوزیته زیادی هستند، به عنوان سیال عامل استفاده شده است. انجام تمامی آزمایش‌ها در شرایط استاندارد اتمسفریک می‌باشد. برای تصویربرداری از میدان پاشش، از روش عکس برداری سریع و روش نوردهی پس زمینه استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش فشار باعث افزایش دبی می‌شود. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز، زاویه مخروطی در ابتدا افزایش می‌یابد و پس از آن که جریان کاملاً توسعه یافته شد، زاویه پاشش ثابت باقی می‌ماند. برای مازوت از عدد رینولدز ۲۶۵ به بعد و برای آب از 7.5×10^4 به بعد زاویه پاشش ثابت می‌ماند. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که طول شکست رفتار مشابهی داشته و با افزایش عدد وبر ابتدا طول شکست کاهش یافته و سپس ثابت می‌ماند. ابتدا، با افزایش عدد وبر برای مازوت تا عدد رینولدز حدود ۵۰ و برای آب تا حدود ۱۷۰ کاهش می‌یابد و با توسعه کامل جریان، طول شکست ثابت می‌ماند. از طرفی، نتایج نشان می‌دهند که ضریب تخلیه تنها به شکل هندسی انژکتور وابسته نبوده و به نوع سیال و عدد رینولدز نیز وابسته است. ضریب تخلیه با افزایش عدد رینولدز برای مازوت تا ۲۰۰ و برای آب تا 5×10^4 افزایش یافته و سپس ثابت می‌ماند. اندازه‌گیری توزیع مکانی، عملکرد انژکتور را در جهت ایجاد اسپری به صورت یک مخروط توخالی تصدیق می‌کند.

واژه‌های کلیدی: اتمیزاسیون، اسپری، انژکتور فشاری-پیچشی، زاویه پاشش، طول شکست، مازوت

Experimental and Analytical Performance Features of a Pressure-Swirl Injector for Heavy Fuel Oil

P. Mikaniki, S.M.A. Najafi, and H. Ghassemi

Mechanical Engineering Department

Iran University of Science and Technology

(Received: 30/January/2017 ; Accepted: 11/September/2017)

ABSTRACT

In this study, a compressive duplex injector was designed, fabricated, and its operational characteristics were investigated. Effects of pressure and viscosity on injector's operational characteristics (i.e., flow rate, discharge coefficient, break-up length, cone angle, spraying spatial distribution, and droplets' mean diameter) were presented as a function of injector's Reynolds and Weber numbers. Water and Mazut were employed as agent fluids due to their high viscosity differences. All experiments were carried out at atmospheric standard conditions. Picturing of spraying area was performed utilizing fast shooting, based on backlighting. The results showed increasing pressure would lead to raise in flow rate. Furthermore, raising Reynolds number leads to initial cone angle increase, then the spraying angle maintains constant as fully developed condition is dominated. The constant spraying angles are observed at Reynolds numbers above 265 and 7.5×10^4 for Mazut and water, respectively. Moreover, break-up lengths are decreased at the Weber numbers lower than 50 and 170 for Mazut and water respectively, followed by maintain constant as the flow pattern is developed. The results showed that discharge coefficient depends on Reynolds number and fluid material, in addition to injector's geometry. The discharge coefficient is increased, as the Reynolds numbers raise to 200 and 5×10^4 for Mazut and water, respectively. The spatial distribution measurements showed significant performance of the injector for creating a hollow cone spray.

Keywords: Atomization, Spray, Pressure-Swirl Injector, Breakup Length, Mazut

۱- کارشناس ارشد: p_mikaniki@alumni.iust.ac.ir

۲- دانشجوی دکترا: manajafi@mecheng.iust.ac.ir

۳- دانشیار (نویسنده پاسخگو): h_ghassemi@iust.ac.ir

فهرست علائم و اختصارات

۱- مقدمه

یکی از روش‌های تبدیل توده سیال به قطرات ریز استفاده از انژکتور است. انژکتور، مایع را به قطرات بسیار کوچک تبدیل می‌کند. جریانی از این قطرات را که موسوم به اسپری هستند، به محیط احتراق هدایت می‌کند. از کاربردهای انژکتورهای سوخت مایع در صنعت شامل بویلرها، کوره‌ها، موتورهای احتراق داخلی و توربین‌های گاز می‌باشد. تعیین مشخصه‌های عملکردی پاشش انژکتور و مطالعه رفتار پاشش کمک‌های ارزشمندی در جهت بهینه‌سازی سامانه احتراق می‌کنند. انژکتورهای فشاری - پیچشی به‌طور گسترده‌ای در محفظه‌های احتراق و حوزه‌های مختلف مهندسی کاربرد دارد. مساحت پاشش و طول شکست برای طراحی اندازه محفظه احتراق و تبخیر عاملی کلیدی است. مطالعه رفتار پاشش سوخت‌های سنگین که سرعت پاشش کمتر و قطر قطرات بزرگ‌تری نسبت به سوخت‌های سبک دارند، بسیار پراهمیت می‌باشد. سوخت‌های نفتی سنگین^۱ مانند نفت کوره یا مازوت به دلیل لزجت زیاد و پیچیدگی در ترکیب به آسانی دیگر مایعات متمایز نمی‌شوند. استفاده از این نوع سوخت به دلیل لزجت بالای آن‌ها و همچنین آلاینده‌های نسبتاً بالای آن‌ها، مشخصاً گوگرد که با احتراق دی‌اکسید گوگرد تولید می‌کنند، دشوار است. حال آن‌که این خواص موجب شده تا این سوخت‌ها به صورت قابل ملاحظه‌ای ارزان بوده، و به همین علت تأمین‌کننده عمده سوخت موتورهای دریایی و در فصول سرد نیروگاه‌های حرارتی می‌باشند. از روش‌های بهبود بازده احتراق سوخت مایع، کاهش اندازه قطر قطرات می‌باشد، لذا بهبود کیفیت پاشش برای محققان و صنعت‌گران پراهمیت است [۱]. از این رو یافتن روشی برای احتراق بهینه و آلاینده‌های کمتر آن‌ها اهمیت بالایی دارد. اسپری سوخت‌های نفتی در فرآیند احتراق نقش مهمی بازی می‌کند. غالب مدل‌های اسپری موجود برای شرایط مربوط به موتورهای کوچک توسعه یافته، بهینه شده‌اند. همچنین بسیاری از مدل‌سازی‌ها از فرضیات زیادی برای ساده‌سازی استفاده می‌کنند. متمایز شدن سوخت‌های مایع فرآیندی است که طی آن یک جت پیوسته مایع به تعداد بسیار زیادی قطره که قطر آنها بسیار کوچکتر از قطر جت مایع است، تبدیل می‌شود. این عمل همراه با افزایش زیاد سطح جانبی کل بوده و در نتیجه

A_0	مساحت سوراخ اریفیس، m^2
A_p	مساحت کل سوراخ‌های ورودی به محفظه چرخش، m^2
A'_p	مساحت کل سوراخ‌های ورودی به محفظه چرخش اصلاح‌شده، m^2
C_d	ضریب تخلیه، (-)
d	قطر معادل ستون هوا، m
d_0	قطر اریفیس، m
d_p	قطر ورودی محفظه چرخش، m
d'_p	قطر ورودی محفظه چرخش اصلاح‌شده، m
D_s	قطر محفظه چرخش، m
k	ثابت هندسی، (-)
k_v	ضریب سرعت، (-)
l	طول مجرای خروجی اریفیس انژکتور، m
L_b	طول شکست، cm
l_p	طول سوراخ ورودی محفظه چرخش انژکتور، m
l_s	طول محفظه چرخش، m
\dot{m}	دبی جرمی، kg/s
Δp	اختلاف فشار، bar
r_0	شعاع اریفیس، m
Re	عدد رینولدز، (-)
SMD	میانگین قطر قطره، μm
U	سرعت فیلم مایع در سوراخ اریفیس، m/s
V_p	سرعت ورود به محفظه چرخش، m/s
We	عدد وبر، (-)

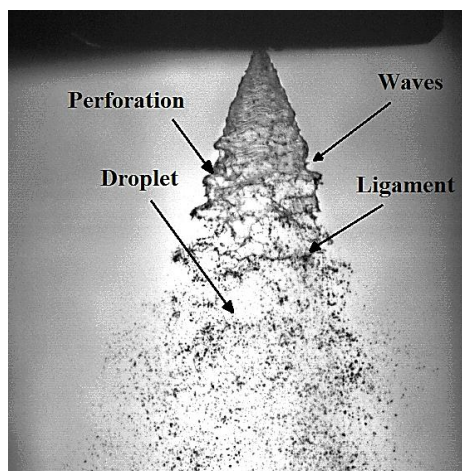
علائم یونانی

ε	بازده پر شدن سوراخ از سیال، (-)
θ	نیم زاویه مخروط پاشش، °
λ	ضریب اصطکاک، (-)
μ	ضریب لزجت دینامیکی، kg/ms
ν	ضریب لزجت سینماتیکی، m^2/s
ρ	جرم مخصوص هوا، kg/m^3
σ	ضریب کشش سطحی، N/m
φ	نسبت سطح مقطع اصلاح شده به واقعی، (-)
Φ	نسبت ضریب تخلیه سیال لزج به ایده‌آل

زیر نویس‌ها

سیال	1
هوا	g

از انژکتورها سپری شده اما به دلیل پیچیدگی پدیده، هنوز روش عددی رضایت بخشی در این حوزه به دست نیامده و بیشترین دانش در دسترس از کارهای تحقیقاتی تجربی به دست آمده است. شبیه‌سازی دقیق از جریان در محفظه انژکتور نیازمند مطالعه رفتار و شرایط جت خروجی از اریفیس می‌باشد [۵].



شکل (۱): روند فروپاشی توده سیال.

۲- مطالعه ادبیات

مطالعات زیادی روی انواع اتمایزر به خصوص اتمایزرهای پیچشی انجام گرفته که می‌توان به مطالعات تاکاساکی و همکاران [۶] اشاره کرد که ویژگی احتراق سوخت‌های سنگین را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دو نوع سوخت مختلف را با درصد هیدروکربن‌های آروماتیک مختلف مورد آزمایش و تحلیل قرار دادند.

در ترکیبات سوخت‌های سنگین هیچ یکنواختی وجود ندارد و کیفیت آن به منبع نفت خام استخراج شده، روش و تجهیزات پالایشگاهی سوخت وابسته است [۷]. گولدورسی و همکاران [۸] تبخیر و احتراق سوخت‌های سنگین موتورهای دیزلی در فشارهای بالا را مورد اندازه‌گیری قرار دادند. در این مقاله پارامترهایی از جمله تاخیر در اشتعال، سرعت و توزیع مکانی اسپری مورد بررسی قرار گرفت. همچنین دو مدل کیفیت سوخت، یکی غنی و دیگری فقیر را مورد آزمایش قرار داد. از نتایج کار می‌توان به تاثیر مستقیم کیفیت سوخت بر پارامترهایی همچون تاخیر در اشتعال و انرژی فعال‌سازی در درجه حرارت بالا اشاره کرد. گولدورسی و همکاران در پژوهشی تجربی فرآیند احتراق را برای دو نوع سوخت مختلف

موجب افزایش انتقال جرم، اندازه حرکت و انرژی بین فازهای گاز و مایع می‌شود. پدیده اتمیزاسیون، تبخیر و احتراق سوخت مایع را ساده‌تر می‌سازد و بدین ترتیب روی راندمان احتراق و آلودگی گازهای خروجی از آن تاثیر مستقیم دارد. لذا شناخت چگونگی اتمیزه شدن سوخت تزریق شده و مخلوط شدن آن با هوای محیط از اهمیت زیادی برخوردار است. اتمیزه کردن سوخت، پدیده‌ای مهم در فرآیند پاشش می‌باشد که بهبود آن به معنای کوتاه‌تر شدن طول شکست اولیه اسپری و کوچک‌تر شدن قطر متوسط قطرات می‌باشد. به گزارش شرکت ملی نفت ایران، امروزه با توجه به وجود میدان نفت سنگین در کشور ایران که ذخایر آنها بیش از ۳۰ میلیارد بشکه تخمین زده می‌شود و همچنین با پیر شدن چاه‌های نفت و برداشت دوم و سوم از منابع نفتی، استحصال نفت‌های فوق سنگین رو به افزایش است. افزایش تقاضا برای گازوئیل همچنین پیشرفت عملیات پایش نفت، تأثیر مستقیمی روی کیفیت سوخت‌های سنگین نفتی داشته است؛ به همین دلیل در حال حاضر بیشتر موتورهای دیزل دریایی از سوخت‌های کم هزینه و بی کیفیت استفاده می‌کنند. اتمایزرهای چرخان باعث تولید اسپری مخروط توخالی می‌شوند [۲]. این اتمایزرها موجب ایجاد اسپری به صورت لایه نازک سیال شده که به علت چرخش اولیه به طور شعاعی پخش می‌شود [۳]. تجزیه و شکست جت سیال به علت رشد امواج ناپایدار در سطح مشترک گاز-مایع و بر اثر تقابل نیروهای آئرو دینامیکی در مرز گاز و سیال رخ می‌دهد [۴]. اصل اساسی در فروپاشی سیال، تعادل بین نیروهای برهم زننده و انسجام دهنده است. نیروهای برهم زننده شامل، انرژی جنبشی، نوسانات فشار، نیروی برشی سیال، اصطکاک و گرانش می‌باشد. نیروهای منسجم‌کننده سیال شامل، لزجت و کشش سطحی است. اسپری مایع شامل فرآیندهای پیچیده فیزیکی می‌باشد. فیلم خروجی مایع به خاطر نیروهای آئرو دینامیکی محیط ناپایدار شده و باعث رشد موج‌ها^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. حدود نیم قرن از تحقیق و بررسی بر روی عملکرد این دسته

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

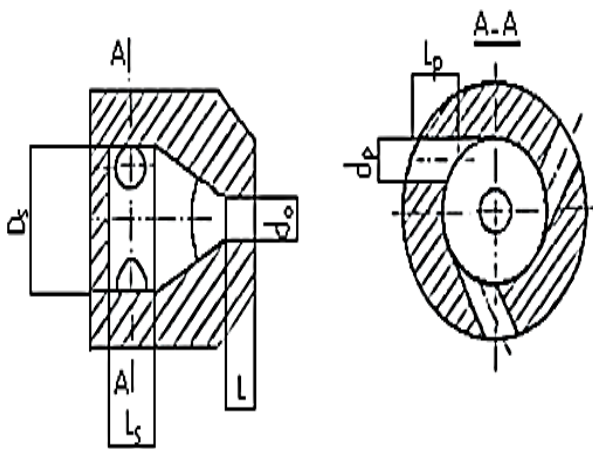
سوخت بیودیزل را با سوخت‌های سنگین مقایسه کردند. آن‌ها دریافتند که سوخت‌های بیودیزل در امتیاز شدن کیفیت بالاتری نسبت به سوخت‌های سنگین دارند.

در این پژوهش مشخصه‌های عملکردی پاشش سوخت مورد بررسی قرار گرفت. از آب و مازوت که دارای اختلاف لزجت زیادی نسبت به هم هستند به عنوان سیال عامل استفاده شد. از جمله این مشخصه‌ها شامل، دبی، ضریب تخلیه، زاویه پاشش، طول شکست، توزیع مکانی پاشش و تعیین قطر متوسط قطره می‌باشد.

۳- طراحی انژکتور [۱۶]

هدف از طراحی، تعیین کردن ابعاد یک انژکتور فشاری-پیچشی می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است. اطلاعات اولیه برای طراحی شامل دبی جرمی (\dot{m})، زاویه پاشش (θ)، اختلاف فشار (Δp)، جرم مخصوص (ρ) و ضریب لزجت سینماتیکی (ν) است. ابتدا ابعاد اولیه را با توجه به ثابت هندسی k محاسبه و سپس سایر ابعاد با توجه به آن تعیین می‌شود.

ابتدا محاسبات را برای سیال ایده‌آل انجام داده و برای α فرض شده، از شکل ۳ مقدار k به دست می‌آید و با توجه به این مقدار ضریب تخلیه C_d محاسبه می‌شود. مقدار d_0 با توجه به رابطه (۱) که مقدار \dot{m} به دست آمده است از رابطه (۲) به دست می‌آید. همچنین، مقدار K از رابطه (۳) حاصل می‌شود.



شکل (۲): ابعاد اولیه یک انژکتور ساده پیچشی [۱۶].

$$\dot{m} = C_d A_0 \sqrt{2\rho\Delta p} \quad (1)$$

مورد بررسی قرار دادند. سوخت دیزل و سوخت سنگین. پارامترهایی از جمله: زاویه پاشش، میزان نفوذ، تاخیر در اشتعال، مساحت شعله و دمای شعله در یک محفظه حجم ثابت با یک گرمکن الکتریکی به دست آورده شدند. نتایج نشان‌دهنده بیشتر بودن عمر و نفوذ قطره برای سوخت سنگین نسبت به دیزل بوده است. تاخیر در اشتعال دیزل از سوخت سنگین کمتر بوده است. همچنین آزمایش‌ها نشان داد که دمای اولیه زیاد، باعث کاهش در تاخیر در اشتعال می‌شود.

محمدی و همکاران [۹] جریان داخلی انژکتور و رفتار اسپری را برای انژکتور پیچشی مورد مطالعه قرار دادند. فینک و همکاران [۱۰] به منظور بهبود و توسعه مدل‌های شبیه‌سازی پاشش، پارامترهای میکروسکوپی و ماکروسکوپی اسپری را برای دو نوع سوخت دیزل نفت سنگین و امولسیون متشکل از دیزل به روش تجربی به دست آوردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که نوع سوخت بر مشخصه‌های عملکردی پاشش تاثیر مستقیم دارد. حسین‌پور و همکاران [۱۱] با استفاده از کد دینامیک سیالات محاسباتی به مطالعه مدل‌سازی دقیق پاشش با استفاده از روش آماری گسسته^۱ و تجزیه اسپری سوخت به روش لاگرانژی پرداختند. کیراکیدس و همکاران [۱۲] محفظه احتراقی با حجم ثابت در فشار بالا را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها شبیه‌سازی را با استفاده از مدل E-TABE و با دو هندسه مختلف انژکتور و با استفاده از سوخت دیزل و سوخت سنگین موتورهای دریایی انجام دادند. آن‌ها به این نتایج رسیدند که اسپری سوخت سنگین در مقایسه با دیزل دارای طول نفوذ بیشتر و قطر قطرات بزرگتری خواهد بود.

پارک و همکاران [۱۳] به مطالعه و تاثیر نوع سوخت در پاشش انژکتور موتورهای دیزل دریایی پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند با افزایش درجه حرارت، طول نفوذ کاهش می‌یابد. گو و همکاران [۱۴] برای درک پدیده‌ها و شرایط واقعی درون موتور، اثر جریان متقابل بر توده اسپری خروجی از انژکتور را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها ذرات و توزیع پاشش سوخت را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش فشار محیط، طول نفوذ کاهش پیدا کرده و توزیع سرعت پاشش سوخت یکنواخت‌تر شده است. قدیمی و همکاران [۱۵] به منظور بهبود بازده سوخت، استفاده از سوخت‌های بیودیزل را مدنظر قرار دادند. آن‌ها

$$V_p = \frac{4\dot{m}}{\rho_i \pi d_p} \quad (7)$$

بنابراین، مقدار Re_i ورودی به محفظه چرخش از رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$Re_i = \frac{4\dot{m}}{\rho v \pi \sqrt{i} d_p} \quad (8)$$

ضریب اصطکاک (λ) نیز از رابطه (۹) برابر است با:

$$\log \lambda = \frac{25.8}{(\log Re_i)^{2.58}} - 2 \quad (9)$$

معادله (۹) برای Re_i در محدوده 10^3 تا 10^6 به کار می‌رود. در صورت برقراری رابطه شرطی (۱۰) می‌توان از اثر لزجت صرف نظر کرد.

$$\frac{B^2}{i} - K \leq \frac{2}{\lambda} (\Phi^{1.5} - 1) \quad (10)$$

مقدار Φ نشان‌دهنده نسبت ضریب تخلیه برای سیال لزج به سیال ایده‌آل است. برای مایعات لزج از رابطه (۱۱) داریم:

$$B = \frac{R}{r_p} < 4 - 5 \quad (11)$$

که شرط (۱۲) باید در آن صدق کند.

$$\frac{B^2}{i} - K < 5 - 10 \quad (12)$$

برای سیالات لزج به جای k از k_λ به صورت زیر استفاده می‌شود.

$$k_\lambda = \frac{Rr_0}{ir_p^2 + \left(\frac{\lambda}{2}\right)R(R-r_0)} \quad (13)$$

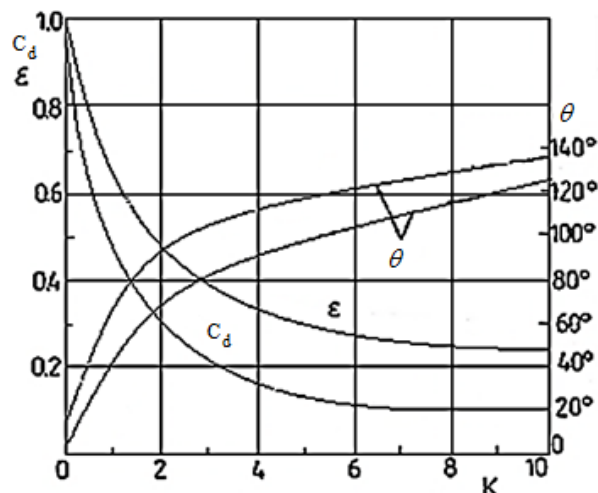
مقادیر B و R نمی‌تواند بیش از اندازه کوچک در نظر گرفته شوند، زیرا در این صورت ابعاد انژکتور کاهش می‌یابد. در سوراخ‌های ورودی به دلیل برخورد بین ذرات مایع، مقدار سطح مقطع واقعی (A'_p) برای هر سوراخ ورودی باید بیشتر فرض شود، بنابراین، باید سطح مقطعی برابر (A_p) در نظر گرفت. بنابراین، از رابطه (۱۴) قطر اصلاح شده (d'_p) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\phi = \frac{A_p}{A'_p} = \left(\frac{d_p}{d'_p} \right)^2, \quad (14)$$

$$\rightarrow d'_p = \frac{d_p}{\sqrt{\phi}}$$

نسبت ϕ در حدود $0.85 \sim 0.9$ تعیین می‌شود.

$$d_0 = \sqrt{\frac{4\dot{m}}{\pi C_d \sqrt{2\rho\Delta p}}} \quad (2)$$



شکل (۳): وابستگی ضریب تخلیه C_d ، بازده پر شدن سوراخ (ϵ) و زاویه پاشش (θ) به ضریب هندسی k بایول [۱۶].

$$k = \frac{2Rd_0}{id_p} \quad (3)$$

از کمیت‌های بالا دو کمیت قابل فرض می‌باشد. معمولاً، $i = 2 \sim 4$ و $R = (2 \sim 4)r_0$ در نظر گرفته می‌شوند (و در اغلب نمونه‌ها مقدار R را ابعاد انژکتور تعیین می‌کند). پس مقدار قطر سوراخ مماسی از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$d_p = \sqrt{\frac{2Rd_0}{ik}} \quad (4)$$

قسمت دوم حل مربوط به سیال لزج خواهد بود. عدد Re_i ورودی به محفظه چرخش انژکتور از رابطه (۵) برابر است با:

$$Re_i = \frac{V_p d}{\nu} \quad (5)$$

که در آن، d قطر معادل ستون هواست که از رابطه (۶) تعیین می‌شود.

$$\frac{\pi d^2}{4} = \frac{i \pi d_p^2}{4} \quad (6)$$

$$\rightarrow d = \sqrt{i} d_p$$

سرعت ورود به محفظه چرخش (V_p) از رابطه (۷) حاصل می‌شود.

انژکتور چرخشی- فشاری طراحی شده برای مازوت با نرخ دبی جرمی ۰/۰۵ کیلوگرم بر ثانیه در فشار ۲۰ بار با نیم زاویه مخروطی ۳۰ درجه طراحی شده است. در شکل ۵ نمایی از انژکتور نشان مشاهده می‌شود. ابعاد انژکتور فشاری- پیچشی طراحی در جدول ۱ مشخص شده است.



شکل (۵): الف) تصویر سمت چپ محافظه چرخش ب) سمت راست محافظه‌ی اصلی انژکتور طراحی و ساخته- شده.

جدول (۱): ابعاد انژکتور طراحی شده.

مقدار (میلیمتر)	شرح	پارامتر
۲	قطر سوراخ ورودی	d_p
۱/۵	قطر سوراخ خروجی	d_0
۱۰	قطر محافظه چرخش	D_s
۱/۵	طول مجرای خروجی	l
۲۰	طول محافظه چرخش	l_s
۶	طول سوراخ ورودی	l_p

مکانیزم کار و شماتیکی از انژکتور طراحی شده در شکل ۶ قابل مشاهده است. سیال ابتدا از طریق سوراخ‌های مماسی بر روی بدنه محافظه چرخش وارد شده و سرعت می‌گیرد. با افزایش سرعت سیال فشار نسبی خلا ایجاد شده و جریان هوا به سمت داخل کشیده می‌شود که باعث ایجاد ستون هوایی در مرکز انژکتور شده و سیال به صورت فیلم از اریفیس خارج می‌شود.

مقدار قطر D_s از رابطه (۱۵) به دست می‌آید که برابر است با:

$$D_s = 2R + d_p \quad (15)$$

طول محافظه چرخش l_s باید کمی بیشتر از قطر سوراخ ورودی باشد. این مقدار برای انجام یک سوم تا یک چهارم چرخش‌ها کافی است، زیرا محافظه بلند شرایط ذره‌سازی را تعیین می‌کند.

سوراخ‌های ورودی باید طول مناسبی داشته باشد تا جت بدون انحراف از مسیر مماسی وارد شود، از رابطه (۱۶) طول l_p به دست می‌آید.

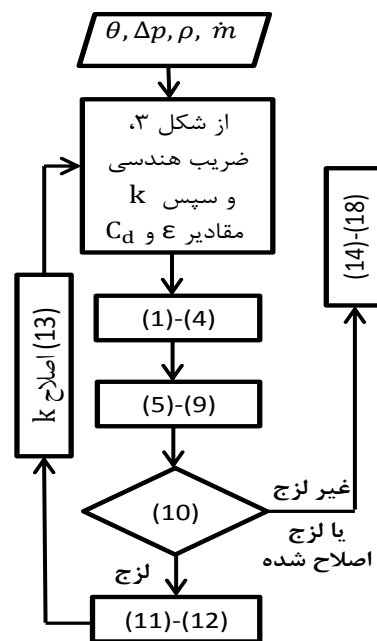
$$l_p = (1.5 - 3) d_p' \quad (16)$$

طول سوراخ خروجی نباید خیلی بلند باشد. بنابراین، شرطی برای k_λ تعریف می‌شود. اگر $k_\lambda < 4 - 5$ باشد، طول سوراخ اوریفیس از رابطه (۱۷) به دست می‌آید.

$$l = (0.5 \sim 1) d_0 \quad (17)$$

اگر $k_\lambda > 4 - 5$ باشد از رابطه (۱۸) استفاده می‌شود.

$$l = (0.25 \sim 0.5) d_0 \quad (18)$$



شکل (۴): روش طراحی.

به منظور بررسی و مطالعه رفتار سوخت سنگین و بررسی مشخصه‌های پاشش، یک انژکتور فشاری- پیچشی ساخته شد.



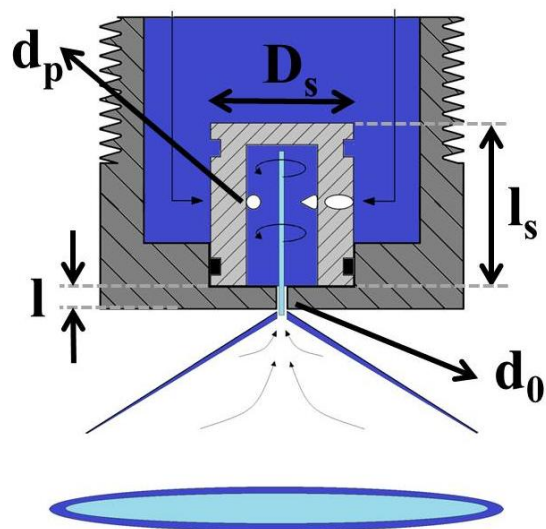
شکل (۷): شماتیکی از چیدمان آزمایش.

۴-۲- روش انجام آزمایش

شماتیک چیدمان آزمایش در شکل ۳ مشخص شده است. ابتدا مخزن (۵) را از طریق ورودی (۴) از مازوت گرم، یا آب پر کرده و تحت فشار گاز نیتروژن (۱) قرار داده می‌شود. فشار گاز از طریق رگلاتور (۲) نصب شده در خروجی سیلندر تنظیم می‌شود. آب از لوله واسط عبور کرده و از طریق انژکتور (۶) خارج می‌شود. فشار آب در لوله درست قبل از انژکتور توسط فشارسنج (۳) قرائت می‌شود. دمای سیال نیز توسط ترموکوپل (۷) قبل از انژکتور ثبت می‌شود. تصویر اسپری حاصله توسط دوربین (۱۱) با استفاده از نورپشتی که توسط منبع (۹) تامین می‌شود و استفاده از فیلتر یکنواخت کننده نور (۸) ثبت می‌گردد. جهت تعیین تاثیر فشار بر مشخصه‌های عملکردی انژکتور، محدوده فشارهای نسبی بین ۰ تا ۳۰ بار در محیط اتمسفری انجام شده‌اند. برای به حداقل رساندن خطای اندازه گیری، هر آزمایش چندین مرتبه تکرار شده است.

۴-۳- روش عکس برداری و نوردهی

برای مطالعه ساختار ظاهری اسپری با استفاده از دوربین سرعت بالا با سرعت عکس برداری کوتاه مدت (در حدود ۱۰ تا ۲۰ میکروثانیه) استفاده شده است. برای اندازه گیری اپتیکی از روش نوردهی پس زمینه^۴ استفاده شده است. در این روش با تاباندن نور در جلوی دوربین و قرار دادن مانعی شفاف بین منبع نور و اسپری می‌باشد. عموماً روش پس زمینه برای محیط شفاف (مانند آب و هوا) مناسب است. در روش پس زمینه



شکل (۶): شماتیک هندسه و ابعاد انژکتور (هندسه با ابعاد واقعی ترسیم نشده است).

۴-۴- معرفی مجموعه آزمایشگاهی

در این بخش به معرفی چیدمان آزمایش، شرایط سیال و محیط آزمایش و روش انجام آزمایش پرداخته می‌شود.

۴-۱-۱- چیدمان آزمایش

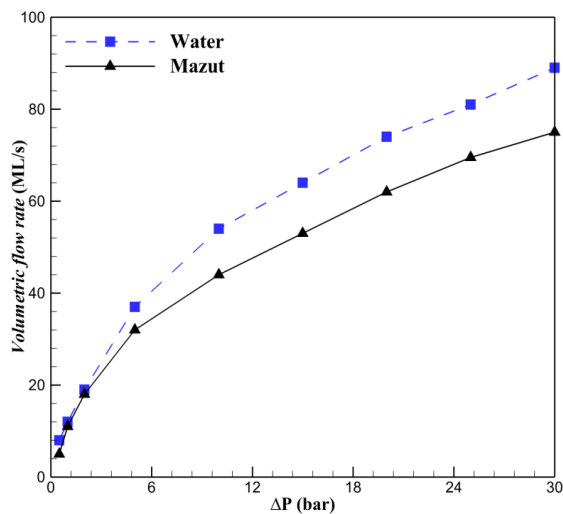
سیستم مورد آزمایش شامل ۱. کپسول گاز نیتروژن؛ که تحمل فشار تا ۱۵۰ بار را دارد. ۲. رگلاتور؛ (رگلاتور نیتروژن هرکولس^۱ جنس برنجی، فشارشکن هرکولس با فشار ورودی ۲۰۰ بار و تنظیم فشار خروجی ۰ تا ۵۰ بار با دقت اندازه گیری ۱ میلی بار و اتصال ۱/۴ اینچ راست گرد)، ۳. فشارسنج هرده^۲ فشار در بازه بین ۰ تا ۱۰۰ بار را با دقت ۱ میلی بار، ۴. شیر ورودی سیال ۵. مخزن سیال تحت فشار؛ که تا فشار ۱۰۰ بار را تحمل می‌کند. ۶. شیر تخلیه، ۷. ترموکوپل نوع K از سیم فلزی (Ni-Cr) و نمایشگر ترموکوپل تیکا، دقت دمای خروجی ۰/۲۵ درجه سانتی گراد بوده و ترموکوپل قابلیت اندازه گیری دما بین ۲۰۰°C- و ۱۳۵۰°C+ را دارد. ۸. انژکتور، ۹. پاشش سیال، ۱۰. دوربین سرعت بالا، زمان نوردهی ۱۰ تا ۲۰ میلی ثانیه، لنز ماکرو نیکون^۳ با فاصله کانونی ۱۰۰ میلی متر، ۱۱. فیلتر یکنواخت کننده نور، ۱۲. منبع نور، ۱۳. سامانه پردازش کننده تصویر PCO می‌باشد که مطابق شکل ۷ معرفی شده است.

1- Hercules

2- Herde

3- Nikon

4- Back Light



شکل (۸): مقایسه دبی حجمی بر حسب اختلاف فشار برای آب و مازوت

۲-۵- اندازه‌گیری ضریب تخلیه

ضریب تخلیه انژکتور نسبت واقعی به تئوری دبی را بیان می‌کند. این پارامتر به دبی انژکتور وابسته است این ضریب اساساً به شکل انژکتور وابسته است [۲۰-۱۸]، اما برخی از تحقیقات تجربی نشان می‌دهد که افت فشار انژکتور نیز بر روی ضریب تخلیه تاثیر می‌گذارد [۲۲-۲۱]. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد ضریب تخلیه با افت فشار تغییر می‌کند به نحوی که با افزایش اختلاف فشار ابتدا افزایش می‌یابد و با افزایش بیشتر اختلاف فشار، ضریب تخلیه کاهش یافته و بعد از مقداری کاهش ثابت می‌ماند. در شکل ۹ ضریب تخلیه برحسب عدد رینولدز نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد، ضریب تخلیه مازوت و آب رفتار مشابه دارند. ضریب تخلیه با افزایش عدد رینولدز برای مازوت تا ۲۰۰ و برای آب تا 5×10^4 افزایش یافته و سپس ثابت باقی می‌ماند.

همچنین، نتایج نشان می‌دهد علاوه بر فشار، جنس سیال نیز بر ضریب تخلیه اثر گذاشته و ضریب تخلیه آب از مازوت بیشتر به دست آمده است؛ زیرا دبی آب نیز از مازوت به دلیل لزجت بیشتر مازوت نسبت به آب بیشتر است. البته در افت فشارهای کم دبی آب و مازوت تقریباً یکسان است.

در اختلاف فشارهای کم (عدد رینولدزهای کم) ستون هوایی مرکزی انژکتور هنوز به صورت کامل شکل نگرفته است. با افزایش اختلاف فشار هسته مرکزی هوا در سوراخ خروجی

معمولاً از فلش لامپ، تولید جرقه، نورهای ال ای دی و یا لیزر به عنوان منبع نور استفاده می‌شود [۱۷]. در این آزمایش از نورافکن ۱,۰۰۰ وات به عنوان منبع نور استفاده شده است.

۴-۴- مشخصات سیال و شرایط آزمایش

از آب و مازوت به عنوان سیال عامل استفاده می‌شود. در جدول ۲ مشخصات و شرایط آزمایش بر روی سیال مشخص شده است.

جدول (۲): مشخصات شرایط آزمایش و سیال.

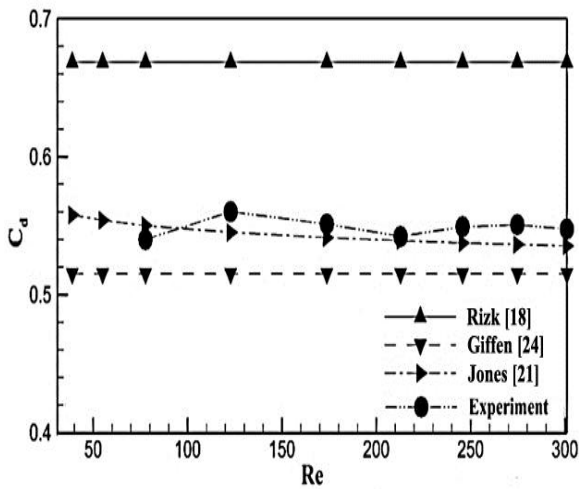
آب	مازوت	شرایط آزمایش
۱۹	۲۱	دمای محیط (°C)
۱۸	۴۰	دمای سیال (°C)
۱۰۰۰	۹۸۰	جرم مخصوص (kg/m ³)
10^{-6}	$273/8 \times 10^{-6}$	لزجت سینماتیکی (m ² /s)
73×10^{-3}	27×10^{-3}	کشش سطحی (N/m)
$1/0.02 \times 10^{-3}$	$273/8 \times 10^{-2}$	لزجت دینامیکی (N.m/s)

۵- نحوه محاسبه نتایج و بحث

نتایج در این بخش به تفصیل توضیح داده شده است.

۵-۱- اندازه‌گیری دبی

دبی خروجی از انژکتور، با اندازه‌گیری دبی در فشارهای مختلف در مدت زمان مشخص به دست می‌آید. در شکل ۸ دبی خروجی از انژکتور در فشارهای مختلف برای آب و مازوت نشان داده شده است. برای دقت آزمایش هر فشار دو بار، برای مدت زمان ۶۰ ثانیه اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش فشار، باعث افزایش دبی می‌شود. این افزایش با شیب تقریباً درجه دو هم برای مازوت و هم آب مشاهده می‌شود.



شکل (۱۰): مقایسه روابط ضریب تخلیه با ضریب تخلیه تجربی مازوت

۳-۵- اندازه‌گیری زاویه پاشش و طول شکست

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. اطلاع از زاویه چتر پاشش با خاموشی شعله و نیز توجه به اثری که در اختلاط سوخت و اکسید باهم و اختلاط با چتر اسپری انژکتورهای مجاور دارد، حائز اهمیت است. در محفظه احتراق توربین گاز، اثر زاویه اسپری بر عملکرد سامانه جرقه زنی بسیار پراهمیت است. همچنین اثر اسپری بر شعله، تولید آلاینده‌ها و تولید گازهای گلخانه‌ای از هیدروکربن‌های نسوخته و دود تأثیر مستقیم دارد. در موتورهای کوچک طول فروپاشی تأثیر زیادی بر توزیع مکانی دارد.

زاویه پاشش و طول شکست از پردازش تصاویر برای هر فشار استخراج شده است. تمامی آزمایش‌ها در شرایط اتمسفریک 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 پس از بررسی چندین عکس در شرایط کاری یکسان، به صورت میانگین اندازه‌گیری انجام شود. یکی دیگر از پارامترهای اصلی در طراحی محفظه احتراق، طول شکست می باشد. سیال خروجی از انژکتور بلافاصله پس از خروج شکسته نمی شود. طول بخشی از افشانه

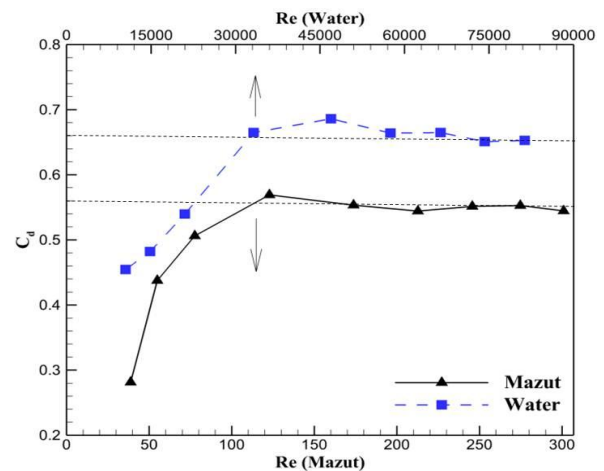
انژکتور به صورت کامل شکل گرفته و با افزایش بیشتر فشار ضریب تخلیه تقریباً ثابت باقی می‌ماند [۲۳].

در این آزمایش‌ها با اندازه‌گیری اختلاف فشار انژکتور و دبی متناظر با آن، میزان ضریب تخلیه از رابطه (۱۹) برای هر میزان از افت فشار برای هر دو سیال آب و مازوت تعیین می‌گردد. اعداد بدون بعد رینولدز و وبر انژکتور از روابط (۲۰) و (۲۱) به‌دست می‌آیند. قطر سوراخ اریفیس (d_0)، چگالی سیال (ρ)، سرعت فیلم خروج از اریفیس (U)، مساحت سوراخ اریفیس (A_0)، لزجت دینامیکی سیال (μ)، کشش سطحی سیال (σ)، دبی جرمی (\dot{m})، اختلاف فشار (Δp) می‌باشد.

$$C_d = \frac{\dot{m}}{A_0 \sqrt{\rho_l \Delta p}} \quad (19)$$

$$Re = \frac{U d_0 \rho_l}{\mu} \quad (20)$$

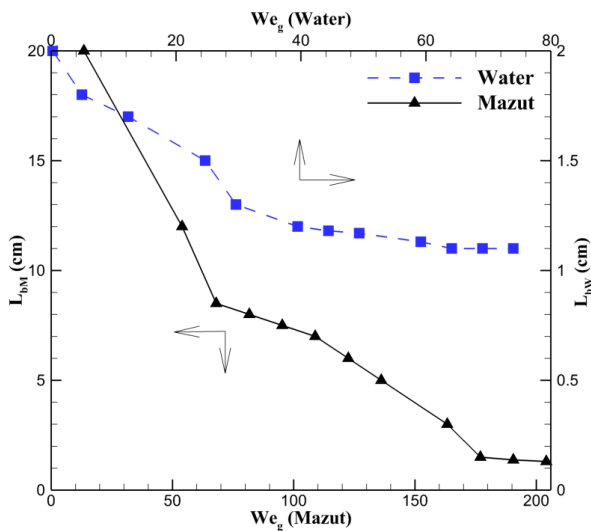
$$We = \frac{U^2 d_0 \rho_l}{\sigma} \quad (21)$$



شکل (۹): مقایسه ضریب تخلیه بر حسب رینولدز انژکتور برای آب و مازوت.

ضریب تخلیه تجربی انژکتور برای مازوت با روابط محققین مقایسه شده و در شکل ۱۰ نشان داده شده است. برای ضرایب تخلیه مازوت با مراجع [۱۸، ۲۱ و ۲۴] مقایسه شد و در این میان با رابطه جونز [۲۱] تطابق خوبی مشاهده می‌شود. علت نوسانات محدود به خاطر خطا در آزمایش می‌باشد. دو داده تجربی اول برای اعداد رینولدز کم به علت نبودن در محدوده اعداد حذف شده است.

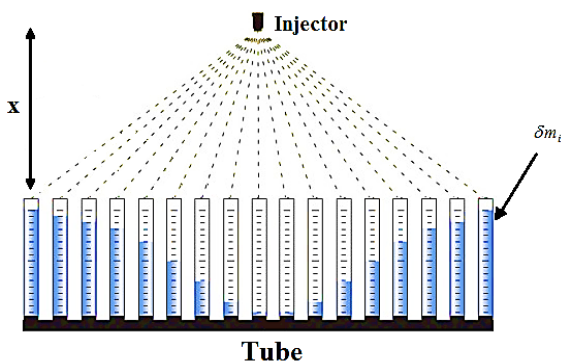
شکل ۱۳ تغییرات طول شکست (L_B) بر حسب عدد وبر را نشان می‌دهد. طول شکست ابتدا با افزایش عدد وبر انزکتور برای مازوت تا ۵۰ و برای آب تا ۱۷۰ کاهش می‌یابد و با توسعه کامل جریان طول شکست ثابت می‌ماند.



شکل (۱۳): تغییرات طول شکست اسپری بر حسب وبر آیرودینامیکی انزکتور.

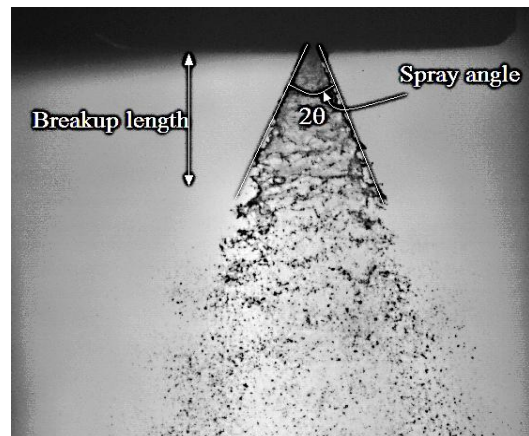
۴-۵- اندازه‌گیری توزیع مکانی پاشش

توزیع مکانی پاشش، شکل حجمی الگوی اسپری خروجی از انزکتور می‌باشد. شماتیک نحوه اندازه‌گیری توزیع مکانی پاشش در شکل ۱۴ نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری توزیع مکانی پاشش با استفاده از مجموعه‌ای مشتمل بر ۱۸۰ لوله (۱۲×۱۵) در مشخصی از انزکتور قرار داده و با مرکز مجموعه لوله‌ها تراز نموده و سپس شیر را در مدت مشخص باز و بسته می‌شود. پس از اتمام کار با اندازه‌گیری حجم آب وارد شده به تک‌تک لوله‌ها (δm_i)، ماتریس توزیع پاشش به‌دست آورده می‌شود.



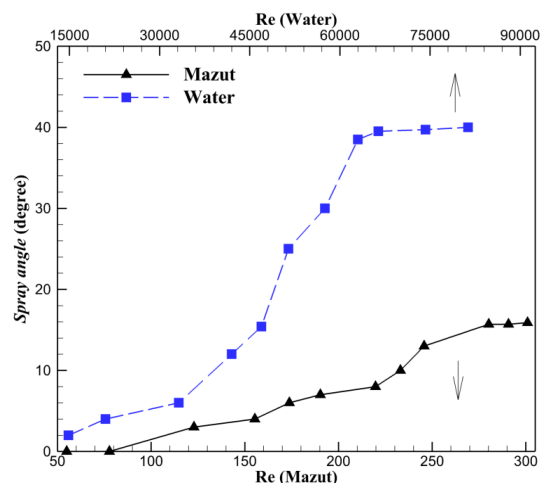
شکل (۱۴): نحوه اندازه‌گیری توزیع مکانی پاشش.

که هنوز شکسته نشده به طول فروپاشی^۱ شناخته می‌شود. نحوه به‌دست آوردن زاویه پاشش و طول شکست در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



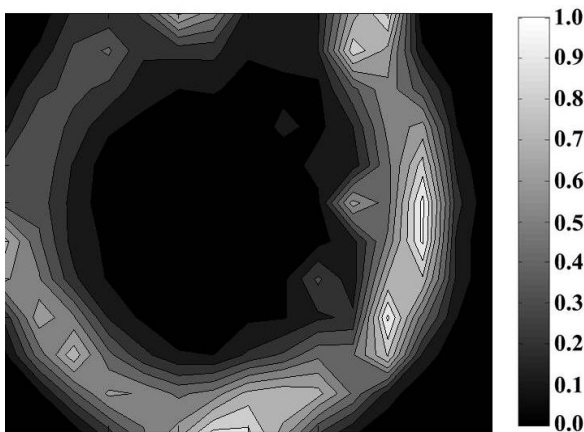
شکل (۱۱): نحوه اندازه‌گیری زاویه پاشش و طول شکست.

نفوذ بیش از اندازه اسپری، منجر به برخورد سوخت بر روی دیواره محفظه شده که باعث اتلاف سوخت خواهد شد. تغییرات عدد رینولدز، Re ، باعث تغییر زاویه پاشش θ می‌شود. در ابتدا افزایش رینولدز باعث افزایش زاویه پاشش می‌گردد اما با افزایش بیشتر عدد رینولدز، زمانی که مخروط کامل توسعه یافته شکل می‌گیرد، زاویه پاشش دیگر افزایش محسوسی نمی‌یابد و تقریباً ثابت می‌ماند. شکل ۱۲ تغییرات زاویه پاشش بر حسب عدد رینولدز را نشان می‌دهد. برای مازوت از عدد رینولدز ۲۶۵ به بعد و برای آب از 7.5×10^4 به بعد زاویه پاشش ثابت است.



شکل (۱۲): تغییرات زاویه پاشش بر حسب عدد رینولدز برای آب و مازوت.

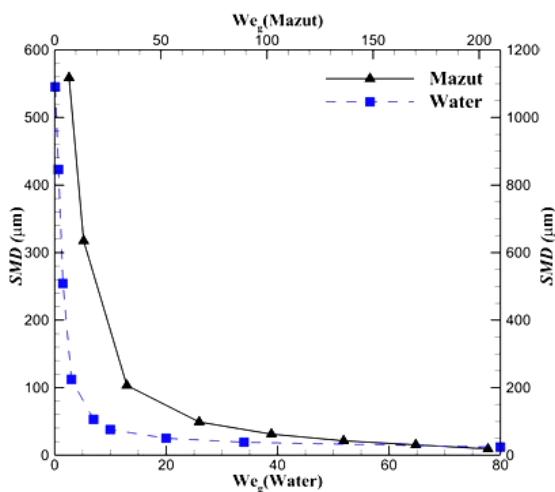
1- Breakup Length



شکل (۱۶): توزیع فضایی پاشش آب در فشار ۲۰ بار در فاصله ۲۰ سانتیمتری از صفحه اریفیس.

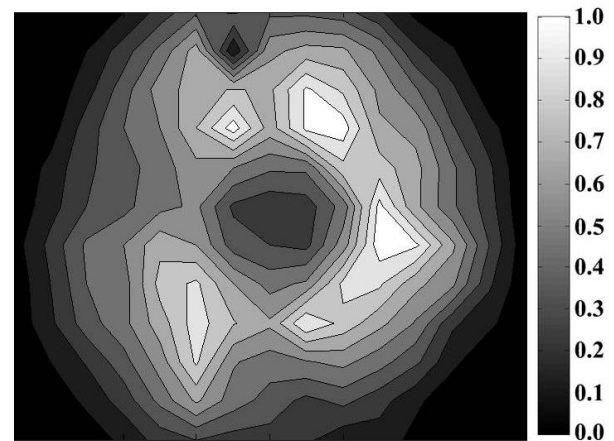
۵-۵- تخمین میانگین قطر قطره

برای تخمین میانگین قطر قطره ساوتر (SMD) انژکتور فشاری- پیچشی از مدل لیسلا^۱ استفاده شده است. این مدل بر مبنای رشد خطی اغتشاشات ایجاد شده روی سطح مایع تخمین می‌زند. در این روش بر مبنای تخمین حداکثر نرخ رشد ناپایداری‌ها و طول موج متناظر، میانگین قطر قطرات ناشی از اتمیزاسیون اولیه محاسبه می‌گردد. شکل ۱۷ مقایسه میانگین قطر قطرات آب و مازوت بر حسب عدد وبر آیرودینامیکی نشان داده شده است. میانگین قطر قطرات بین ۵۰۰ تا ۲۰ میکرومتر برای آب و برای مازوت بین ۱۲۰۰ تا ۵۰ میکرومتر به دست آمده است. عدد وبر مازوت صفر تا دوپست و عدد وبر آب در محدوده صفر تا هشتاد قرار دارد.



شکل (۱۷): میانگین قطر قطرات بر حسب عدد وبر برای آب و مازوت.

نتایج آزمایش درصد توزیع مکانی پاشش در فشار ۲۰ بار در فاصله ۲۰ سانتیمتری از انژکتور ($X=20\text{cm}$) برای مازوت شکل ۱۵ و آب شکل ۱۶ نشان داده شده است.



شکل (۱۵): توزیع مکانی پاشش مازوت در فشار ۲۰ بار در فاصله ۲۰ سانتیمتری از صفحه اریفیس.

کانتورهای رسم شده در شکل‌های ۱۵ و ۱۶، به ترتیب درصد پاشش توزیع دبی جرمی مازوت و آب را برای فشار ۲۰ بار و در فاصله ۲۰ سانتیمتری از صفحه اریفیس را نمایش می‌دهند. دبی جرمی بر اساس بیشترین مقدار نرمالایز شده است، بنابراین توزیع دبی جرمی از صفر (کمترین توزیع دبی جرمی پاشش) تا یک (بیشترین توزیع دبی جرمی) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد پاشش به صورت مخروطی بوده، در مرکز مخروط تقریباً پاشش صورت نمی‌گیرد و پاشش روی محیط دایره انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که الگوی پاشش آب در مقایسه با مازوت در مساحت بزرگتری انجام شده است که ناشی از زاویه پاشش بزرگتر آب در مقایسه با مازوت در فشار ۲۰ بار است. همان‌طور که در نتایج اندازه‌گیری زاویه نشان داده شده است زاویه مخروطی پاشش آب حدود ۲/۵ برابر مازوت اندازه‌گیری شده است. توزیع مکانی دبی جرمی کیفیت الگوی پاشش در محفظه احتراق را نشان می‌دهد. الگوی پاشش مطلوب تضمینی بر تبخیر سریع‌تر سوخت و اختلاط بهتر سوخت و هوا بوده و در نتیجه بالا رفتن راندمان احتراق را به همراه خواهد داشت. هرچه توزیع مکانی پاشش یکنواخت‌تر و متقارن‌تر باشد، کیفیت احتراق بالاتر می‌رود. عدم توزیع یکنواخت در پاشش باعث احتراق ناقص و تولید آلاینده و همچنین کاهش بازده می‌شود [۲۲].

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش یک انژکتور فشاری- پیچشی با کاربرد در محفظه های احتراق برای سوخت سنگین ساخته شد و مورد بررسی تجربی قرار گرفت. ویژگی های پاشش دو سیال آب و سوخت سنگین (مازوت ۳۸۰)، به نمایندگی از دو سیال با سامانه بسیار متفاوت، مورد مطالعه قرار گرفتند. پارامترهای اندازه گیری شده در آزمایش های تجربی، فشار پشت انژکتور، دبی و توزیع مکانی پاشش بودند. ضریب تخلیه انژکتور، زاویه پاشش و طول شکست نیز مشخصاتی بودند که با استفاده از پارامترهای اندازه گیری شده و روش پردازش تصویر مورد بررسی قرار گرفتند و تغییرات آنها به صورت تابعی از اعداد رینولدز و وبر انژکتور بیان شده است. همچنین میانگین قطر قطرات نیز به روش تحلیلی لیسا محاسبه شد. نتایج نشان می دهند با افزایش عدد رینولدز زاویه پاشش ابتدا افزایش می یابد و با توسعه کامل جریان زاویه پاشش ثابت می ماند. برای مازوت از عدد رینولدز ۲۶۵ به بعد و برای آب از $4 \times 10^4 \times 7.5$ به بعد زاویه پاشش ثابت است. همچنین طول شکست ابتدا با افزایش عدد وبر برای مازوت تا ۵۰ و برای آب تا ۱۷۰ کاهش می یابد و با توسعه کامل جریان طول شکست ثابت می ماند. نتایج نشان می دهند ضریب تخلیه تنها به شکل هندسی انژکتور وابسته نبوده و به نوع سیال و عدد رینولدز وابسته است. ضریب تخلیه با افزایش عدد رینولدز برای مازوت تا ۲۰۰ و برای آب تا $4 \times 10^5 \times 5$ افزایش یافته و سپس ثابت باقی می ماند. همچنین نتایج نشان می دهند با افزایش عدد وبر ابتدا میانگین قطر قطرات کاهش یافته است و با افزایش بیشتر تغییرات نامحسوس است.

۷- قدردانی

بخشی از هزینه های کار تحقیقاتی حاضر تحت حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه علم و صنعت ایران از آزمایشگاه تحقیقاتی پیشرانس فضایی انجام شده است. بدین وسیله از تمامی مسئولین ذیربط قدردانی می شود.

۸- مراجع

- Senecal, P.K., Schmidt, D.P., Nouar, I., Rutland, C.J., Reitz, R.D., and Corradini, M.L. "Modeling High-speed Viscous Liquid Sheet Atomization", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 25, No. 6, pp. 1073-1097, 1999.
- Ibrahim, A. "Comprehensive Study of Internal Flow Field and Linear and Non-linear Instability of an Annular Liquid Sheet Emanating from an Atomizer", Ph.D Dissertation, Faculty of Mechanical Engineering, University of Cincinnati, 2006.
- Shirokar, J., Coimbra, C., and McQuay, M.Q. "Fundamental Aspects of Modeling Turbulent Particle Dispersion in Dilute Flows", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 22, No. 6, pp. 363-399, 1996.
- Ballester, J. and Dopazo, C. "Drop Size Measurements in Heavy Oil Sprays from Pressure-swirl Nozzles", *Atomization and Sprays*, Vol. 6, No. 4, pp. 377-408, 1996.
- Tagasaki, K., Tajima, H., Nakashima, M., and Ishida, H. "Combustion Characteristics of Trouble-making Bunker Fuel Oil", *Journal of MTZ Worldwide*, Vol. 63, No. 6, pp. 18-20, 2002.
- Zhao, S., Xu, Z., Xu, C., and Chung, K.H. "Feedstock Characteristic Index and Critical Properties of Heavy Crudes and Petroleum Residua", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 41, No. 1, pp. 233-242, 2004.
- Goldsworthy, L. "Computational Fluid Dynamics Modelling of Residual Fuel Oil Combustion in the Context of Marine Diesel Engines", *International Journal of Engine Research*, Vol. 7, No. 2, pp. 181-199, 2006.
- Mohammadi, H., Jabbarzadeh, P., Jabbarzadeh, M., and Shrevani-Tabar, M.T. "Numerical Investigation on The Hydrodynamics of the Internal Flow and Spray Behavior of Diesel Fuel in a Conical Nozzle Orifice with the Spiral Rifling Like Guides", *Fuel*, Vol. 196, No. 1, pp. 419-430, 2017.
- Fink, C., Buchholz, B., Niendorf, M., and Harndorf, H. "Injection Spray Analyses from Medium Speed Engines Using Marine Fuels"; *Proc. Int. Conf. Liquid Atomization and Spray Systems*, European, 2008.
- Hossainpour, S., and Binesh, A. "Investigation of Fuel Spray Atomization in a DI Heavy-duty Diesel Engine and Comparison of Various Spray Breakup Models", *Fuel*, Vol. 88, No. 5, pp. 799-805, 2009.
- Kyriakides, N., Chryssakis, C., and Kaiktsis, L. "Development of a Computational Model for Heavy Fuel Oil for Marine Diesel Engine Applications"; *Proc. Int. Conf. Multidimensional Engine Modeling*, Detroit, USA, 2009.
- Garaniya, V.B. "Modeling of Heavy Fuel Oil Spray Combustion, Using Continuous Thermodynamics", Ph.D Dissertation, Faculty of Maritime Engineering, University of Tasmania, 2009.

19. Dombrowski, N. and 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.
20. Taylor, I.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.
21. Jones, A. "Factors Affecting the Performance of Large Swirl Pressure Jet Atomizers", *CEGB Laboratory*, Vol. 52, No. 10, pp. 54-55, 1982.
22. Ballester, J., and Dopazo, C. "Discharge Coefficient and Spray Angle Measurements for Small Pressure-swirl Nozzles", *Atomization and sprays*, Vol. 4, No. 3, pp. 351-367, 1994.
23. Cousin, J., Ren, W., and Nally, S. "Transient Flows in High Pressure Swirl Injectors", *SAE Technical Paper*, Vol. 104, pp. 580-589, 1998.
24. Giffen, E., and Muraszew, A. "The Atomisation of Liquid Fuels", *Chapman and Hall*, Vol. 58, pp. 246-245, 1953.
13. Park, J., Jang, J.H., and Park, S. "Effect of Fuel Temperature on Heavy Fuel Oil Spray Characteristics in a Common-rail Fuel Injection System for Marine Engines", *Ocean Engineering*, Vol. 104, No. 3, pp. 580-589, 2015.
14. Guo, M., Shimasaki, N., Nishida, K., Ogata, Y., and Wada, Y. "Experimental Study on Fuel Spray Characteristics under Atmospheric and Pressurized Cross-flow Conditions", *Fuel*, Vol. 184, No. 1, pp. 846-855, 2016.
15. Ghadimi, P., Nowruzi, H., Yousefifard, M., and Chekab, M.A.F. "A CFD Study on Spray Characteristics of Heavy Fuel Oil-based Microalgae Biodiesel Blends under Ultra-high Injection Pressures", *Meccanica*, Vol. 52, No. 2, pp. 153-170, 2017.
16. Bayvel, L. "Liquid Atomization", *CRC Press*, Los Angeles, United States, 1993.
17. Buchhave, P., Lading, L., and Wigley, G. "Optical Diagnostics for Flow Processes", *Springer Science & Business Media*, California, United States, 2013.
18. Rizk, N. and Lefebvre, A.H. "Internal Flow Characteristics of Simplex Swirl Atomizers", *J. of Propulsion and Power*, Vol. 1, No. 3, pp. 193-199, 1985.

