



بررسی تجربی و عددی مشخصات قطره‌سازی سوخت‌های دیزل و مازوت تزریق‌شده از یک انژکتور فشاری-پیچشی

الیاس رستمی^۱ و حسین مهدوی مقدم^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصرالدین طوسی، تهران، elyas.rostami@email.kntu.ac.ir

۲- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصرالدین طوسی، تهران، mahdavy@kntu.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۲، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۲)

چکیده: در این پژوهش تلاش شده است تا روش‌های تجربی و عددی، به منظور اندازه‌گیری پارامترهای قطره‌شوندگی یک سوخت غیرنیوتنی سنگین نفتی به نام مازوت و یک سوخت سبک نفتی به نام دیزل، مورد استفاده قرار گیرد و همچنین چگونگی رفتار اسپری این سوخت‌ها مطالعه شود. از تجهیزات تصویربرداری بسیار قدرتمندی برای ثبت تصاویر اسپری سوخت‌ها استفاده شد و با آنالیز تصاویر داده‌های مدنظر استخراج شد. در نهایت، از روش بیشینه آنتروپی برای تحلیل عددی تابع توزیع جریان اسپری سوخت‌ها استفاده شد. از اختلاف فشار ۱۵ بار به بعد تقریباً نرخ جریان جرم سوخت‌ها ثابت باقی می‌ماند (بین ۱/۶ تا ۱/۸ گرم بر ثانیه). زاویه مخروط اسپری سوخت مازوت در ابتدا افزایش می‌یابد و پس از آنکه جریان به سمت قطره‌سازی کامل نزدیک شود (در دمای بالای ۹۰ درجه و فشار بالای ۱۵ بار)، تقریباً به مقدار ثابت ۸۰ درجه می‌رسد (مخروط زاویه اسپری دیزل هم به مقدار تقریباً ثابت ۸۵ درجه می‌رسد). طول شکست و قطر قطرات نیز با افزایش دما و فشار سوخت روندی نزولی را طی کرده و با توسعه کامل جریان، تقریباً به سمت مقدار صفر میل می‌کنند. توزیع قطر اندازه قطرات با افزایش گرانشی سیال و توزیع سرعت قطرات با کاهش گرانشی سیال صاف‌تر و یکنواخت‌تر می‌شود.

کلیدواژگان: تست تجربی، قطره‌سازی، حل عددی، بیشینه آنتروپی

مقدمه

قطره‌سازی معمولاً به تجزیه جریان مایع از طریق انژکتور برای ریختن در یک محیط گازی اشاره دارد. عملکرد موتور سوخت مایع بستگی به خصوصیات تزریق ایجادشده توسط انژکتورها دارد. اگر سیستم تزریق سوخت بهینه شود، فرایند احتراق بهبود می‌یابد. بنابراین، بازده سیستم و نیروی رانش افزایش می‌یابد [۱]. قطره‌سازی مایع دارای مکانیزم پیچیده‌ای است که به شدت به عوامل داخلی و خارجی انژکتور بستگی دارد. قطره‌سازی به سرعت مایع، نرخ جریان، گرانشی سیال و گاز محیطی بستگی دارد. قطره‌سازی تأثیر مستقیمی بر بازده احتراق و آلودگی گازهای خروجی دارد. تبخیر قطرات ریز و تشکیل مخلوط سوخت تأثیر قابل توجهی بر آلاینده‌های خروجی موتور دارد. بنابراین، بسیار مهم است که بدانید چگونه سوخت قطره شده و با هوای محیط مخلوط می‌شود. انژکتورهای سوخت مایع (به عنوان مثال، انژکتور فشاری-پیچشی) در صنایع مختلف شامل دیگ‌های بخار، کوره‌ها، موتورهای احتراق داخلی، توربین‌های گازی، موتورهای راکت سوخت مایع و صنعت کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تعیین خصوصیات عملکردی اسپری و مطالعه رفتار اسپری به بهینه‌سازی سیستم احتراق کمک می‌کند. سوخت‌های سنگین نفتی (به عنوان مثال، مازوت)، به دلیل گرانشی زیاد، به راحتی قطره نمی‌شوند و همچنین به علت میزان بالای آلاینده‌ها (به ویژه گوگرد و دی‌اکسید گوگرد) معمولاً از آن‌ها استفاده نمی‌شود. این ویژگی‌ها این نوع سوخت را به طور قابل توجهی ارزان‌تر می‌کند.

بنابراین، در فصول سرد در موتورهای دریایی و نیروگاه‌های حرارتی از سوخت‌های سنگین نفتی استفاده می‌شود. بهبود کیفیت اسپری برای محققان مهم است، به طوری که با کاهش اندازه قطرات، بازده احتراق سوخت‌های مایع بهبود می‌یابد. کیفیت اسپری تأثیر مستقیمی بر دامنه پایداری، بازده احتراق و انتشار آلاینده‌ها دارد [۲].

قطره‌شدن مایع مکانیزم پیچیده‌ای دارد و به شدت به عوامل داخلی و خارجی از انژکتور وابسته است و به طور کلی این قطره‌شدن از سطح مایع و به علت تأثیر نیروهای آیرودینامیک شروع می‌شود که اندازه بزرگی این نیروها به سرعت جریان و به غلظت گاز محیط بستگی دارد. انژکتورها، به عنوان وسایل ایجاد اسپری، یکی از اجزای بسیار مهم موتورهای سوخت مایع بوده و تأثیر مهمی بر روی عملکرد موتور دارند. انژکتورهای فشاری-پیچشی یکی از بهترین و مهم‌ترین انواع انژکتورهای موتورهای سوخت مایع با توجه به ویژگی‌های مطلوب مورد تایید، مانند هزینه‌های ساخت و مونتاژ کم، عملیاتی بودن و پاشش مطلوب برای احتراق پایدار، بوده و همواره مورد توجه و استعمال است. تاگاساکی و همکاران [۳] خواص احتراق سوخت‌های سنگین را مطالعه کردند. دو نوع مختلف سوخت با هیدروکربن‌های آروماتیک مختلف مورد آزمایش و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. ژائو و همکاران [۴] به این نتیجه رسیدند که هیچ یکنواختی در ترکیب سوخت‌های سنگین قابل تشخیص نیست و کیفیت سوخت‌های سنگین به منبع نفت خام استخراج‌شده و تجهیزات پالایشگاه سوخت بستگی دارد. گولدورثی [۵] به بررسی تبخیر و احتراق سوخت‌های سنگین و سوخت دیزل در موتورهای دیزلی در فشارهای بالا پرداخت. پارامترهایی مانند زاویه پاشش، میزان نفوذ، تاخیر اشتعال، منطقه شعله و دمای شعله در محفظه حجم ثابت با یک گرمکن الکتریکی به دست آمد. نتایج نشان داد که طول عمر و نفوذ قطرات در سوخت سنگین بیشتر از سوخت دیزل است و تاخیر اشتعال سوخت دیزل کمتر از سوخت سنگین است. همچنین، آزمایش‌ها نشان دادند که درجه حرارت اولیه بالا تاخیر اشتعال را کاهش می‌دهد. فینک و همکاران [۶] برای بهبود و توسعه مدل‌های شبیه‌سازی اسپری، پارامترهای میکروسکوپی و ماکروسکوپی را به صورت تجربی برای پاشش نفت کوره سنگین و شیرابه آن با گازوییل به دست آوردند. نوع سوخت تأثیر مستقیمی بر خصوصیات عملکرد اسپری داشت. کایریاکیدز و همکاران [۷] یک محفظه احتراق با حجم ثابت را در فشار بالا شبیه‌سازی کردند. شبیه‌سازی توسط مدل E-TABE با دو هندسه انژکتور مختلف با استفاده از سوخت دیزل و سوخت سنگین موتورهای دریایی انجام شده است. اسپری سوخت سنگین دارای طول نفوذ طولانی‌تر و قطر قطره بزرگ‌تری از سوخت دیزل است. پارک و همکاران [۸] اثر نوع سوخت را در پاشش انژکتور موتورهای دیزل دریایی بررسی کردند. با افزایش دما، طول نفوذ کاهش می‌یابد. گائو و همکاران [۹] با استفاده از عکس‌برداری پرسرعت، اثر شرایط جریان عرضی را بر توده اسپری سوخت بنزین در موتورهای تزریق مستقیم بررسی کردند. اندازه قطرات سوخت و توزیع اسپری سوخت مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش فشار محیط، طول نفوذ اسپری کاهش یافته و توزیع سرعت اسپری یکنواخت‌تر می‌شود. قدیمی و همکاران [۱۰] از سوخت‌های بیودیزل برای بهبود کارایی احتراق استفاده کردند. سوخت بیودیزل با سوخت‌های سنگین مقایسه شد. سوخت‌های بیودیزل از کیفیت قطره‌سازی بالاتری نسبت به سوخت‌های سنگین برخوردار بودند. شاهسون [۱۱]، با در نظر گرفتن یک سوخت چندجزئی، تمام خواص ترموفیزیکی سوخت مازوت را استخراج کرد. خصوصیات روغن سوخت سنگین به دو دسته تقسیم می‌شوند: (۱) مشخصاتی که به نوع سیال وابسته‌اند و هیچ تغییرات محسوسی با فشار و دما ندارند؛ (۲) مشخصاتی که بسیار به شرایط سیال، مانند دمای سوخت، وابسته‌اند. بادر و همکاران [۱۲] یک مطالعه تجربی و عددی در مورد توزیع اندازه قطرات اسپری روغن سوخت سنگین انجام دادند. نتایج ارائه‌شده نشان می‌دهد که اسپری مطلوب سوخت سنگین بخشی اساسی در عملکرد فرایند گازسازی است. همچنین، نتایج نشان داد که زاویه پاشش انژکتور از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا هرچه زاویه پاشش کمتر شود، طول گازساز بیشتر افزایش می‌یابد. اگرچه، هنگامی که زاویه پاشش افزایش می‌یابد و طول گازساز کاهش می‌یابد، باید نواحی گردابی^۱ و برخوردی ذرات با دیواره‌ها در نظر گرفته

1. emulsion
2. Vortex

شود. میکائیکی و همکاران [۱۳] نشان دادند که با افزایش دما و فشار اسپری یک سوخت سنگین، قطر قطره و طول شکست کاهش می‌یابد و زاویه پاشش افزایش می‌یابد.

طی چند سال گذشته، مطالعات زیادی در مورد فرمول‌بندی مدل‌های مختلف برای توصیف روند تجزیه جت و تشکیل قطرات انجام شده است [۱۴]. جاینس [۱۵] اصل بیشینه آنتروپی (MEP) را معرفی کرد و این اصل در ترمودینامیک، توزیع آماری، توزیع چگالی، طراحی برنامه‌ریزی شهری، تجزیه و تحلیل جغرافیایی، نجوم، پیش‌بینی آب‌وهوا، پردازش سیگنال، تئوری بازی، اقتصاد و زیست‌شناسی استفاده شده است. اصل بیشینه آنتروپی، به‌عنوان جایگزینی برای رویکرد تجربی، توزیع اندازه ذرات را مدل می‌کند. اصل بیشینه آنتروپی توسط سلنس و برزوستوفسکی [۱۶] و لی و تانکین [۱۷] توسعه داده شده است که در آن از معادلات بقا و معادله انرژی سطح جزئی استفاده شده است. معادله بقای تکانه برای هر یک از اجزای سرعت به‌طور جداگانه در نظر گرفته شد تا مشکل مقدار منفی عبارت چشمه تکانه حل شود. احمدی و سلنس [۱۸] از معادلات بقای انرژی و جرم برای به‌دست‌آوردن توزیع اندازه قطرات مستقل از توزیع سرعت استفاده کردند. لی و همکاران [۱۹] روش بیشینه آنتروپی را اصلاح کردند و نتایج را با داده‌های تجربی یک جت مایع دایره‌ای مقایسه کردند. چین و همکاران [۲۰]، با استفاده از روش لی، معادلات بیشینه آنتروپی را ساده کرده و توزیع اندازه قطرات را در یک جت مایع استوانه‌ای مدل‌سازی کردند. داموچل [۲۱] مدلی را براساس استفاده از توزیع پیش‌احتمال ارائه کرد که نتایج قابل‌قبولی را برای قطره‌سازهای اولتراسونیک و دوحالتی ارائه داد. میترا و لی [۲۲]، از طریق تجزیه و تحلیل موج ناپایدار روی سطح جت، برخی از داده‌های ورودی را به‌عنوان جایگزینی برای اندازه‌گیری‌های تجربی ارائه دادند. موحد نژاد و همکاران [۲۳] از تجزیه و تحلیل ناپایداری خطی برای به‌دست‌آوردن ویژگی‌های جریان بالادستی، که در روش بیشینه آنتروپی استفاده شده، استفاده کردند. یان و همکارانش [۲۴] با استفاده از روش بیشینه آنتروپی سرعت و توزیع اندازه قطرات یک قطره‌ساز فشاری-پیچشی را به‌دست آوردند.

بررسی مشخصات پاشش سیالاتی مانند مازوت و دیزل، که بسیار کاربردی در صنعت امروز کشورمان و همچنین دنیاست و استفاده از روشی نوین به‌نام بیشینه آنتروپی و توسعه آن در پیش‌بینی توزیع سرعت و اندازه قطرات سیالات پاشیده‌شده از یک انژکتور فشاری پیچشی گامی بسیار نوین در این عرصه است. هدف از این مطالعه توسعه روش‌های اندازه‌گیری تجربی برای تعیین خصوصیات قطره‌سازی سوخت‌های واقعی و کاربردی، به‌منظور گازسازی و استفاده در نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌ها، تولید توان (برق) و تولید محصولات شیمیایی مختلف (مانند متانول، اتانول و آمونیاک) و توسعه مدل بیشینه آنتروپی برای پیش‌بینی توزیع اندازه و سرعت قطرات، است.

تجهیزات تجربی

نفت کوره یا مازوت یکی از هیدروکربن‌های نفتی است که در مراحل تصفیه نفت خام به‌دست می‌آید و چون سیاه‌رنگ است، به نام نفت سیاه نیز خوانده می‌شود. این ماده ارزان‌ترین ماده سوختنی برای کوره حمام‌ها و تنور نانوایی‌ها و موتورهای دیزل و برخی نیروگاه‌هاست. مازوت یک مایع سیاه کاملاً متراکم است که در دمای پایین نیمه‌جامد است. سوخت دیزل به‌عنوان سوخت موتورهای دیزلی و تأسیسات حرارتی به‌کار می‌رود. این سوخت بیشتر از روش ویژه‌ای در تقطیر جزء‌به‌جزء نفت مازوت به‌دست می‌آید. سوخت مازوت و سوخت دیزل از پالایشگاه نفت تهران تأمین شده است. خصوصیات شیمیایی سوخت‌ها در دماهای مختلف در آزمایشگاه تحقیقات صنعت نفت مطابق با استاندارد ASTM-D اندازه‌گیری شده است. خصوصیات شیمیایی سوخت‌ها در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱- پارامترهای شیمیایی سوخت‌ها

1. Maximum Entropy Principle
2. Mazut
3. American Society for Testing and Materials-Miscellaneous Materials

Table 1- Chemical parameters of fuels

	Kinematic viscosity (m ² /s)	Dynamic viscosity (kg/ms)	Density (kg/m ³)	Surface tension (kg/s ²)
Diesel (25 °C)	2.7315×10 ⁻⁶	0.0022601	828.75	0.026195
Mazut (80 °C)	56×10 ⁻⁶	0.05	936.31	0.027
Mazut (90 °C)	33.405×10 ⁻⁶	0.03	930.745	0.0263
Mazut (100 °C)	10.81×10 ⁻⁶	0.01	925.21	0.0255

سیستم تزریق سوخت شامل یک مخزن سوخت مازوت همراه با گرمکن، مخزن سوخت دیزل، فیلتر سوخت، پمپ، گرمکن، کنترل کننده، دو فشارسنج، دو دماسنج، شیرها و انژکتور است. انژکتور فشاری-پیچشی برای پاشش سوخت به درون هوای محیط استفاده می شود. قطر روزنه انژکتور (d_o) ۰/۳ میلی متر است. تکنیک سایه نگاری برای ضبط تصاویر استفاده می شود و همچنین از روش پردازش تصویر برای تجزیه و تحلیل و گرفتن داده ها از عکس های اسپری سوخت استفاده می شود. هر آزمایش چندین بار تکرار شده است تا خطاهای اندازه گیری به حداقل برسد و از تکرار نتایج اطمینان حاصل شود. به منظور اطمینان از کیفیت اندازه گیری های تجربی، درصد عدم قطعیت هر پارامتر در جدول ۲ گزارش شده است.

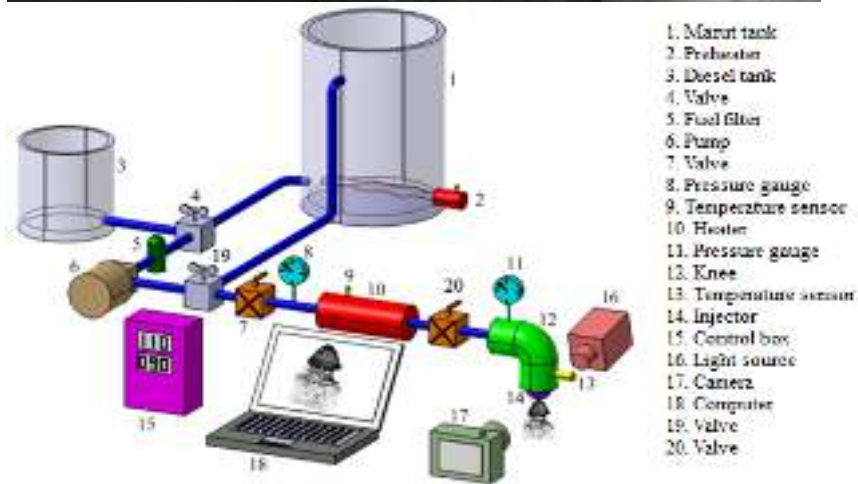
جدول ۲- درصد عدم قطعیت مشخصات های اندازه گیری شده

Table 2- Measured characteristics uncertainty percentage

Parameter	Uncertainty percentage
Mass flow rate (gr/s)	3.045
Angle (degree)	1.3
Breakup length (mm)	4.52
Mean diameter (μ m)	4.8
Temperature (°C)	0.2
Pressure (bar)	1.25

تجهیزات تجربی در شکل ۱ نشان داده شده است. از آنجا که گرانیوی سوخت مازوت در دمای محیط زیاد است، باید به اندازه کافی از قبل گرم شود تا در سیستم استفاده شود. برای انجام این کار، یک گرمکن، که قادر به گرم کردن سوخت تا ۸۰ درجه سانتی گراد است، در داخل مخزن سوخت مازوت نصب شده است. پس از انجام هر آزمایش تزریق سوخت مازوت، به منظور جلوگیری از بسته شدن مسیر در هنگام سرد شدن سیستم، مسیر تزریق باید تمیز شود. از این رو، یک مخزن سوخت دیزل برای پاک سازی مازوت از داخل مسیر تزریق نصب شده است. مخزن سوخت مازوت یک استوانه استیل ضد زنگ با یک عنصر حرارتی ۵۰۰ وات به منظور پیش گرم کردن سوخت مازوت است. سطح خارجی مخزن سوخت مازوت، گرمکن و مسیر تزریق کاملاً با پوشش عایق حرارتی سرامیکی پوشانده شده است تا از اتلاف حرارت جلوگیری شود.

مازوت یک سوخت سنگین چالش برانگیز است و به راحتی اسپری نمی شود. روند قطره سازی سوخت مازوت و رفتار اسپری آن در دما و فشارهای مختلف پیش نیاز مطالعه احتراق این سوخت و طراحی محفظه احتراق متناسب با آن است. دیزل هم یک سوخت پر کاربرد و سبک نفتی است که رفتار اسپری آن در مقایسه با سوخت مازوت درک درستی از پدیده قطره سازی سوخت ها به ما می دهد. زاویه پاشش، طول شکست، قطر قطرات و توزیع قطر و سرعت قطرات از جمله مهم ترین پارامترهای قطره سازی سوخت اند که نقش بسیار مهمی در طراحی و عملکرد محفظه احتراق دارند. به همین منظور، در این مطالعه پارامترهای قطره سازی سوخت ها به صورت تجربی و عددی محاسبه شده و مورد مقایسه باهم قرار گرفته اند.



The control box consists of an indicator to show the heater temperature and the fuel temperature before spraying, also, a PID type controller to control the function of the thermal cartridge element inside the burner and to control pump and fuel flow on and off events.

Figure 1- Fuel testing equipment
 شکل ۱- تجهیزات دستگاه تست سوخت

مازوت یک سوخت سنگین چالش برانگیز است و به راحتی اسپری نمی شود. روند قطره سازی سوخت مازوت و رفتار اسپری آن در دما و فشارهای مختلف پیش نیاز مطالعه احتراق این سوخت و طراحی محفظه احتراق متناسب با آن است. دیزل هم یک سوخت پر کاربرد و سبک نفتی است که رفتار اسپری آن در مقایسه با سوخت مازوت درک درستی از پدیده قطره سازی سوختها به ما می دهد. زاویه پاشش، طول شکست، قطر قطرات و توزیع قطر و سرعت قطرات از جمله مهم ترین پارامترهای قطره سازی سوخت اند که نقش بسیار مهمی در طراحی و عملکرد محفظه احتراق دارند. به همین منظور، در این مطالعه پارامترهای قطره سازی سوختها به صورت تجربی و عددی محاسبه شده و مورد مقایسه باهم قرار گرفته اند.

اصل بیشینه آنتروپی

فرمول بندی بیشینه آنتروپی یک روش آماری است. بسیاری از سیستم های فیزیکی ممکن است به وسیله خواص کلی یا مقادیر میانگینی که برای کل سیستم مشخص است توصیف شوند. در این قسمت از فرمول بندی بیشینه آنتروپی، که توسط موحدنژاد [۲۵] ارائه شد، برای استخراج معادلات حاکم و تعیین توزیع اندازه و سرعت ذرات استفاده می شود. برای این منظور، یک حجم کنترل در خروجی انژکتور در نظر گرفته می شود. حجم کنترل به صورتی است که ورودی حجم کنترل، خروجی انژکتور بوده و تا محلی که قطرات تشکیل می شوند ادامه می یابد. شکل ۲ حجم کنترل مربوط به پاشش مخروطی را نشان می دهد.

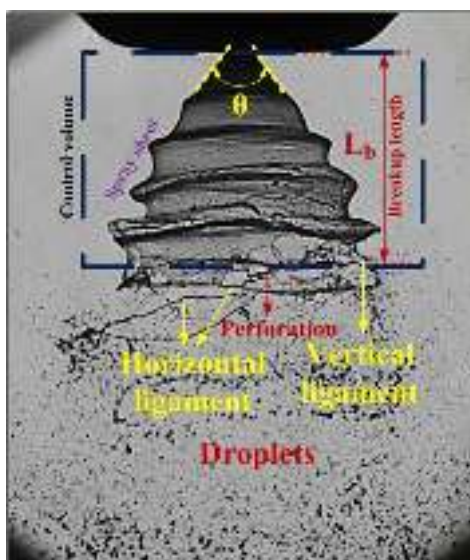


Figure 2- Control volume of cone-shaped spray
 شکل ۲- حجم کنترل پاشش مخروطی شکل

فرایند تشکیل قطره در داخل حجم کنترل می تواند به صورت انتقال از یک حالت تعادلی به حالت تعادلی دیگر در نظر گرفته شود. قوانین ترمودینامیک بیان می دارند که در طی انتقال از یک حالت تعادلی به حالت تعادلی دیگر، در کنار بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی تابع آنتروپی بیشینه خواهند شد. بنابراین، پایه مدل ریاضی در پاششها، تشخیص و طرح مناسب معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی برای آنالیز سیستم های پاشش است. با توجه به فرمول بندی بیشینه آنتروپی، معادلات بقا می توانند به صورت عبارتهایی از تابع چگالی احتمال P_{ij} بیان شوند. احتمال پیدا کردن قطره ای با حجم V_i و سرعت u_i را نشان می دهد. بنابراین، معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی به صورت زیر بیان می شوند:

$$\sum_i \sum_j P_{ij} V_i \rho \dot{n} = \dot{m}_o + s_m \quad (۱) \text{ بقای جرم}$$

$$\sum_i \sum_j P_{ij} V_i \rho \dot{n} u_j = \dot{J}_o + s_{mu} \quad (۲) \text{ بقای اندازه حرکت}$$

$$\sum_i \sum_j P_{ij} \dot{n} (V_i \rho u_j^2 + 2\sigma A_i) = \dot{E}_o + s_e \quad (۳) \text{ بقای انرژی}$$

در این معادلات، \dot{n} نرخ تولید قطرات در پاشش، \dot{m}_o ، \dot{J}_o و \dot{E}_o به ترتیب دبی جرم، اندازه حرکت و انرژی اند که از خروجی انژکتور وارد حجم کنترل می‌شوند و s_m ، s_{mu} و s_e به ترتیب پارامترهای چشمه برای معادلات جرم، اندازه حرکت و انرژی اند که برای هر پارامتر اضافی، که در این معادلات منظور نشده است، بکار می‌روند. قطرات، علاوه بر انرژی جنبشی، دارای یک انرژی سطحی اند که برای تشکیل قطره لازم است. بدین جهت عبارت $2\sigma A_i$ در معادله بقای انرژی منظور شده است. شکل مناسب‌تر این معادلات می‌تواند از بی‌بعد کردن معادلات به وسیله \dot{m}_o ، \dot{J}_o و \dot{E}_o به دست آید. با توجه به تعریف‌های سرعت متوسط تکانه‌ای و حجم متوسط قطرات در پاشش، معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی به صورت زیر در می‌آیند:

$$\sum_i \sum_j P_{ij} \left(\frac{V_i}{V_m} \right) = 1 + \frac{s_m}{\dot{m}_o} \quad (۴) \text{ بقای جرم}$$

$$\sum_i \sum_j P_{ij} \left(\frac{u_j}{\bar{u}_o} \right) = 1 + \frac{s_{mu}}{\dot{J}_o} \quad (۵) \text{ بقای اندازه حرکت}$$

$$\sum_i \sum_j P_{ij} \left(\frac{V_i}{V_m} \right) \frac{1}{H} \left[\left(\frac{u_j}{\bar{u}_o} \right)^2 + B' k_i \right] = 1 + \frac{s_e}{\dot{E}_o} \quad (۶) \text{ بقای انرژی}$$

در این معادلات، k_i نسبت مساحت به حجم قطرات در اندازه گروه i است، $k_i = \frac{A_i}{V_i}$ و $B' = \frac{2\sigma}{\rho U_o^2}$. H فاکتور شکل پروفیل سرعت است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$H = \frac{\left(\frac{\dot{E}_o}{\dot{m}_o} \right)}{U_o^2} = \frac{\left(\frac{\dot{E}_o}{\dot{m}_o} \right)}{\left(\frac{\dot{J}_o}{\dot{m}_o} \right)^2} \quad (۷)$$

وقتی پروفیل سرعت خروجی یکنواخت است مقدار فاکتور شکل (H) برابر ۱ است. با تعریف حجم، سرعت و پارامترهای چشمه بی‌بعد به صورت $\bar{V}_i = \frac{V_i}{V_m}$ و $\bar{u}_j = \frac{u_j}{U_o}$ و $\bar{s}_m = \frac{s_m}{\dot{m}_o}$ و $\bar{s}_{mu} = \frac{s_{mu}}{\dot{J}_o}$ و $\bar{s}_e = \frac{s_e}{\dot{E}_o}$ ، معادلات (۴) تا (۶) به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\sum_i \sum_j P_{ij} \bar{V}_i = 1 + \bar{s}_m \quad (۸) \text{ بقای جرم}$$

$$\sum_i \sum_j P_{ij} \bar{V}_i \bar{u}_j = 1 + \bar{s}_{mu} \quad (۹) \text{ بقای اندازه حرکت}$$

$$\sum_i \sum_j P_{ij} \frac{\bar{V}_i}{H} \left[(\bar{u}_j)^2 + B' k_i \right] = 1 + \bar{s}_e \quad (۱۰) \text{ بقای انرژی}$$

علاوه بر این سه رابطه، با توجه به مفهوم احتمال، مجموع احتمالات موجود باید برابر یک باشد:

$$\sum_i \sum_j P_{ij} = 1 \quad (۱۱)$$

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، بی‌نهایت دسته از توزیع‌های احتمال P_{ij} وجود دارد که معادلات (۸) تا (۱۱) را ارضا می‌کند. از این مجموعه جواب، مناسب‌ترین توزیع آن است که آنتروپی شانن را بیشینه کند.

$$S = -K \sum_i \sum_j P_{ij} \ln P_{ij} \quad (12) \text{ آنتروپی شانن}$$

با استفاده از روش ضرایب لاگرانژ، توزیع احتمالی، که این آنتروپی را بیشینه کند، به صورت رابطه (۱۳) به دست می آید.

$$P_{ij} = \exp[-\lambda_0 - \lambda_1 \bar{V}_i - \lambda_2 \bar{V}_i \bar{u}_j - \lambda_3 \left(\frac{\bar{V}_i \bar{u}_j^2}{H} + \frac{B' k_i \bar{V}_i}{H} \right)] \quad (13)$$

برای به دست آوردن ضرایب λ_i باید معادلات (۸) تا (۱۱) و (۱۳) به طور هم زمان حل شوند. احتمال پیدا کردن قطراتی که حجم آن‌ها بین \bar{V}_{n-1} و \bar{V}_n و سرعت آن‌ها بین \bar{u}_{m-1} و \bar{u}_m باشد به صورت زیر است:

$$P\{\bar{V}_{n-1} \leq \bar{V} \leq \bar{V}_n, \bar{u}_{m-1} \leq \bar{u} \leq \bar{u}_m\} = \sum_{\bar{V}_{n-1}} \sum_{\bar{u}_{m-1}} P_{ij} \\ = \sum_{\bar{V}_{n-1}} \sum_{\bar{u}_{m-1}} \exp[-\lambda_0 - \lambda_1 \bar{V}_i - \lambda_2 \bar{V}_i \bar{u}_j - \lambda_3 \left(\frac{\bar{V}_i \bar{u}_j^2}{H} + \frac{B' k_i \bar{V}_i}{H} \right)] \quad (14)$$

عموما در پاشش، اندازه و سرعت قطرات به طور پیوسته تغییر می کنند که در این صورت می توان میدان حل را به طور یکنواخت گسسته کرده و به جای استفاده از Σ ، معادلات را به صورت انتگرالی روی اندازه و سرعت قطره بیان کرد. همچنین، می توان میدان حل را از حجم و سرعت قطره به قطر و سرعت قطره تغییر داد. بنابراین، احتمال پیدا کردن قطراتی که قطر آن‌ها بین \bar{D}_{n-1} و \bar{D}_n و سرعت آن‌ها بین \bar{u}_{m-1} و \bar{u}_m است به صورت زیر است:

$$P\{\bar{V}_{n-1} \leq \bar{V} \leq \bar{V}_n, \bar{u}_{m-1} \leq \bar{u} \leq \bar{u}_m\} = P\{\bar{D}_{n-1} \leq \bar{D} \leq \bar{D}_n, \bar{u}_{m-1} \leq \bar{u} \leq \bar{u}_m\} \\ = \int_{\bar{D}_{n-1}}^{\bar{D}_n} \int_{\bar{u}_{m-1}}^{\bar{u}_m} 3\bar{D}^2 \exp \left[-\lambda_0 - \lambda_1 \bar{D}^3 - \lambda_2 \bar{D}^3 \bar{u} - \lambda_3 \left(\frac{\bar{D}^3 \bar{u}^2}{H} + \frac{B\bar{D}^2}{H} \right) \right] d\bar{D} d\bar{u} \\ = \int_{\bar{D}_{n-1}}^{\bar{D}_n} \int_{\bar{u}_{m-1}}^{\bar{u}_m} f d\bar{D} d\bar{u} \quad (15)$$

که در این رابطه، f تابع چگالی احتمال اندازه و سرعت قطرات است:

$$f = 3\bar{D}^2 \exp \left[-\lambda_0 - \lambda_1 \bar{D}^3 - \lambda_2 \bar{D}^3 \bar{u} - \lambda_3 \left(\frac{\bar{D}^3 \bar{u}^2}{H} + \frac{B\bar{D}^2}{H} \right) \right] \\ we = \frac{\rho U_0^2 D_{30}}{\sigma} \quad B = \frac{12}{we} \quad (16)$$

سرعت نسبی بین مایع و گاز خیلی نزدیک به سرعت مایع در ناحیه مورد نظر این بررسی است (محل تشکیل قطرات). قطرات تولیدشده در پاشش به طور نسبی کوچک بوده و معمولاً فرض می شود که در اثر کشش سطحی شکل کروی داشته باشند. معادلات (۸) تا (۱۱) نیز می توانند به صورت انتگرالی و در میدان حل سرعت و قطر قطره بیان شوند. بنابراین، با توجه به مطالب بیان شده، برای به دست آوردن ضرایب لاگرانژ (λ_i) در تابع چگالی احتمال (f) لازم است که دستگاه معادلات زیر حل شود.

$$\int_{\bar{D}_{min}}^{\bar{D}_{max}} \int_{\bar{u}_{min}}^{\bar{u}_{max}} f \bar{D}^3 d\bar{u} d\bar{D} = 1 + \bar{S}_m \\ \int_{\bar{D}_{min}}^{\bar{D}_{max}} \int_{\bar{u}_{min}}^{\bar{u}_{max}} f \bar{D}^3 \bar{u} d\bar{u} d\bar{D} = 1 + \bar{S}_{mu} \\ \int_{\bar{D}_{min}}^{\bar{D}_{max}} \int_{\bar{u}_{min}}^{\bar{u}_{max}} f \left(\frac{\bar{D}^3 \bar{u}^2}{H} + \frac{B\bar{D}^2}{H} \right) d\bar{u} d\bar{D} = 1 + \bar{S}_e \\ \int_{\bar{D}_{min}}^{\bar{D}_{max}} \int_{\bar{u}_{min}}^{\bar{u}_{max}} f d\bar{u} d\bar{D} = 1 \\ f = 3\bar{D}^2 \exp \left[-\lambda_0 - \lambda_1 \bar{D}^3 - \lambda_2 \bar{D}^3 \bar{u} - \lambda_3 \left(\frac{\bar{D}^3 \bar{u}^2}{H} + \frac{B\bar{D}^2}{H} \right) \right] \quad (17)$$

همان طور که در معادلات مشاهده می‌شود، میدان حل از \bar{D}_{min} تا \bar{D}_{max} و از \bar{u}_{min} تا \bar{u}_{max} تغییر می‌کند. تغییرات \bar{D} و \bar{u} در داخل میدان حل مستقل از هم هستند. بدین معنی که احتمال وجود هر قطره‌ای با سرعت دلخواه \bar{u} و قطر دلخواه \bar{D} در داخل میدان حل در نظر گرفته می‌شود. از نرم‌افزار متلب برای حل دستگاه معادلات (۱۷) به روش عددی نیوتن-رافسون استفاده شده است. روش بیشینه آنتروپی برای پیش‌بینی توزیع قطر و سرعت قطرات اسپری به کار می‌رود. این روش در مورد پدیده‌هایی که اطلاعات کمی از آن‌ها در دسترس است و جواب‌های متعددی می‌تواند شرایط مدل فیزیکی آن را ارضا کند بسیار پرکاربرد است و محتمل‌ترین جواب این‌گونه پدیده‌ها آن است که منجر به بیشینه‌شدن آنتروپی شانون شود.

روش بیشینه آنتروپی یک روش اثبات‌شده و بسیار پرکاربرد است که استفاده از آن برای سوخت‌های واقعی سبک و سنگین نفتی و مقایسه نتایج آن با نتایج تجربی از نوآوری‌های این پژوهش است. اصل حداکثر آنتروپی بیان می‌کند توزیعی که با توجه به اطلاعات داده‌شده یا داده‌های مورد آزمایش بهترین حالت را نشان می‌دهد، توزیعی است که حداکثر آنتروپی را دارد یا به عبارتی میزان غیرقابل پیش‌بینی بودن آن نسبت به دیگر توزیع‌هایی که با اطلاعات موجود می‌توان ساخت بیشتر است. برای مثال، فرض کنید از یک توزیع احتمالاتی تنها میانگین و واریانس آن را داریم. با استفاده از اطلاعات داده‌شده، بی‌نهایت متغیر تصادفی قابل تولید است، اما متغیر تصادفی را انتخاب می‌کنیم که حداکثر آنتروپی را دارد. اصل حداکثر آنتروپی ارتباطی با فرضی کلیدی از نظریه جنبشی گازها، که به‌عنوان هرج‌ومرج مولکولی شناخته می‌شود، دارد. ادعا می‌شود ذراتی که وارد برخورد می‌شوند را می‌توان با استفاده از اصل حداکثر آنتروپی مشخص کرد. اگرچه این بیانیه می‌تواند به‌عنوان یک نظریه فیزیکی شناخته شود، ولی می‌توان آن را به‌عنوان فرضیه‌ای مبتنی بر محتمل‌ترین پیکربندی ذرات پیش از انجام برخورد دانست. در واقع، پیش از برخورد، ذرات آرایشی را به خود می‌گیرند که بیشترین آنتروپی ممکن را داشته باشند.

نتایج مدل بیشینه آنتروپی با توزیع تجربی لی و همکاران [۲۶] مقایسه می‌شود تا دقت روش عددی بررسی شود. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب نمودارهای توزیع اندازه و توزیع سرعت را برحسب قطر قطره و سرعت قطره برای سیال آب نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل‌های ۳ و ۴ مشخص است، نتایج مدل بیشینه آنتروپی با دقت بسیار خوبی توزیع تجربی اندازه و سرعت قطرات آب را پیش‌بینی می‌کند.

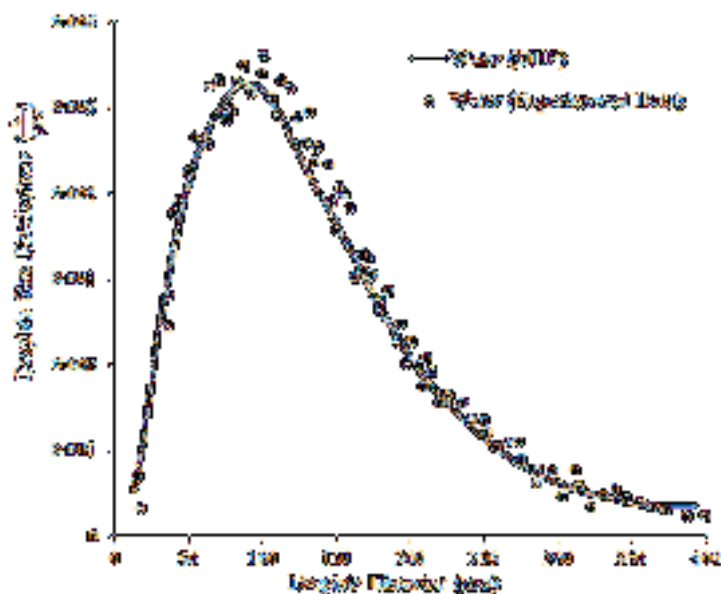


Figure 3- The changes of droplet size distribution for water

شکل ۳- تغییرات توزیع اندازه قطر برای سیال آب

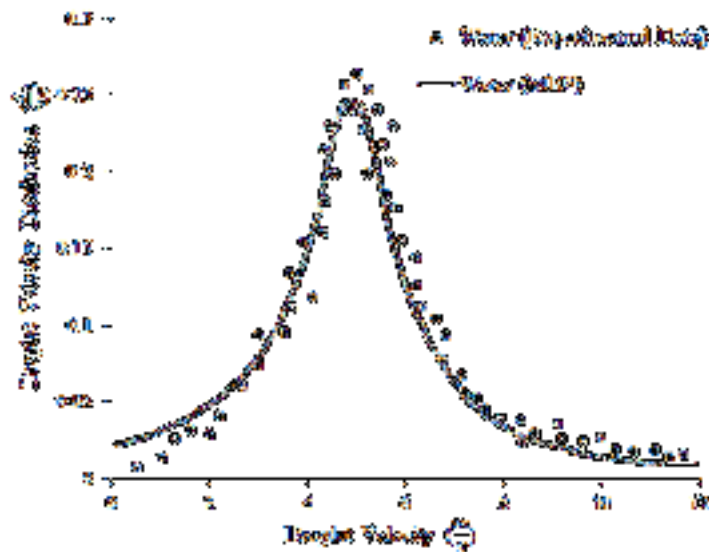


Figure 4- The velocity distribution changes for water
 شکل ۴- تغییرات توزیع سرعت برای سیال آب

اسپری سوخت دیزل و سوخت مازوت

سوخت دیزل در اختلاف فشارهای مختلف (۱ بار، ۳ بار، ۵ بار، ۱۰ بار، ۱۵ بار و ۲۰ بار) و دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد پاشیده می‌شود. روند تاثیر این تغییرات فشار بر اسپری سوخت دیزل در شکل ۵ نشان داده شده است. اسپری دیزل با فشار ۱ بار پیازی شکل است. همچنین، اسپری دیزل با فشار ۳ بار به شکل گل لاله است. قطره‌سازی کامل برای سوخت دیزل در فشار بالاتر ایجاد می‌شود.

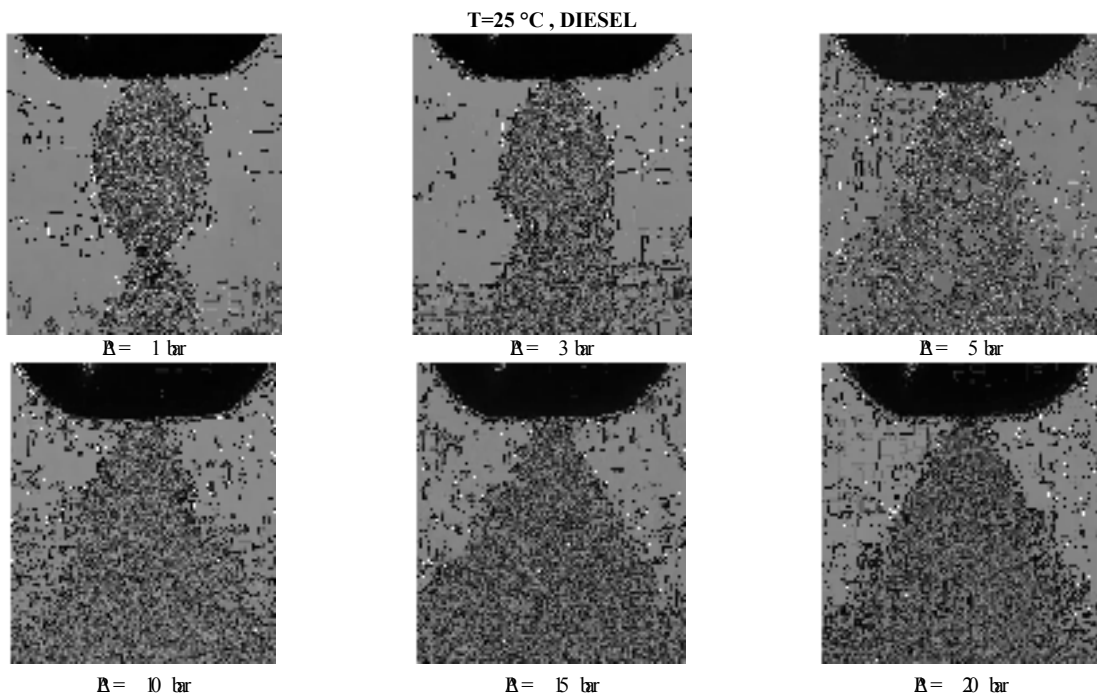


Figure 5- Diesel spray behavior
 شکل ۵- رفتار اسپری دیزل

سوخت مازوت نیز در اختلاف فشارهای مختلف (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ بار) در دماهای مختلف (۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) پاشیده می‌شود. روند تاثیر این تغییرات دما و فشار بر روی اسپری سوخت مازوت در شکل ۶ نشان داده شده است.

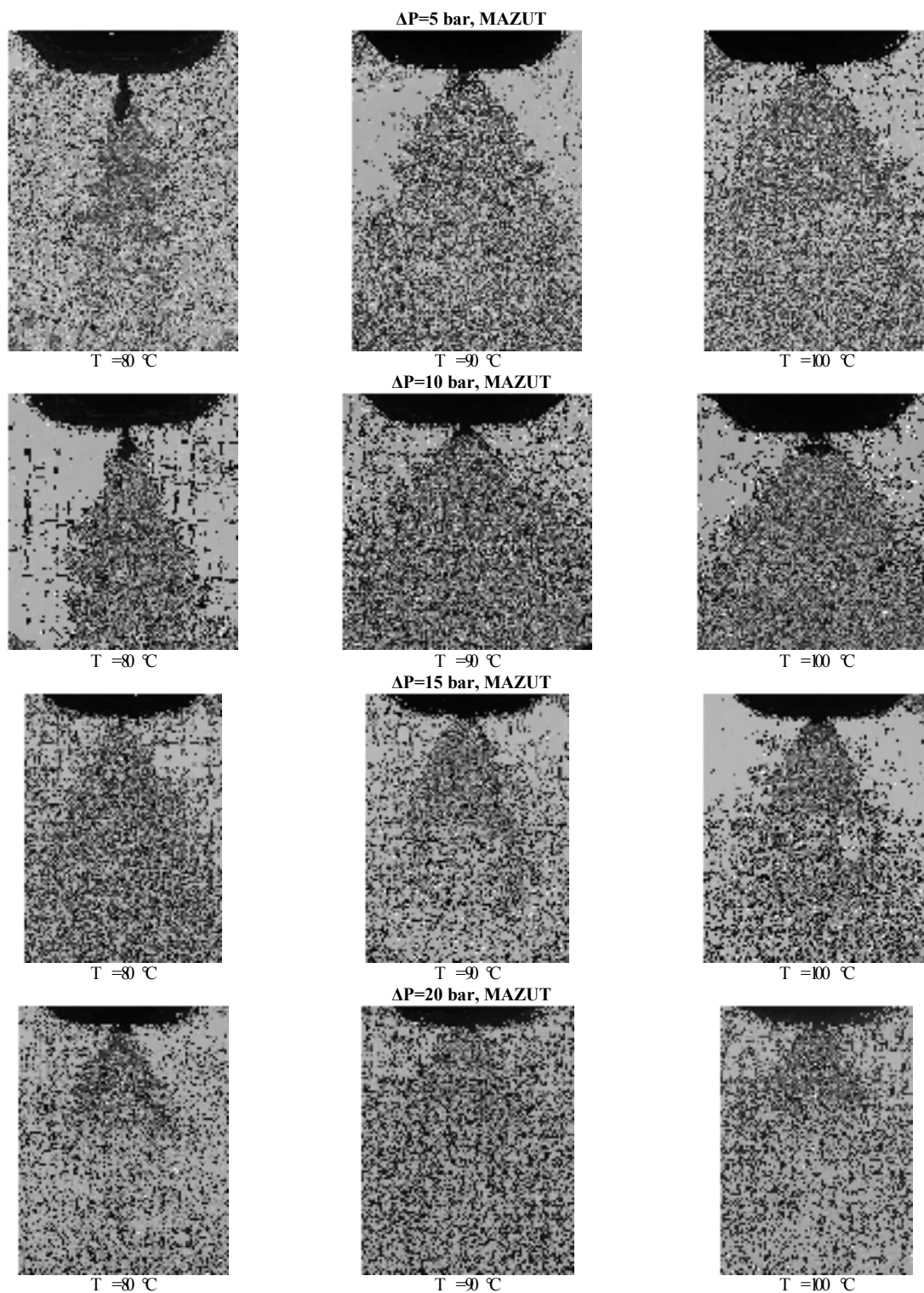


Figure 6- Mazut spray behavior
شکل ۶- رفتار اسپری مازوت

احتراق سوخت‌های سنگین به‌عنوان منبع اساسی ذرات معلق، گازهای گلخانه‌ای، SOx و NOx در نظر گرفته می‌شود. گازسازی یک فرایند پیشرفته و رویکرد سازگار با محیط زیست است که باعث ایجاد گازهای تمیز مانند هیدروژن می‌شود. برخی از گازسازها از سوخت مازوت سنگین استفاده می‌کنند. بنابراین، قطره‌شدن مازوت به‌منظور تعیین بازده گازساز بسیار مهم است. سوخت مازوت یک مایع سنگین غیرنیوتنی است. بنابراین، ویژگی‌های قطره‌سازی مازوت در دماهای مختلف بررسی می‌شود. سوخت توسط انژکتور به درون گازساز تخلیه می‌شود. یک قطره‌سازی مناسب از سوخت در گازساز این اطمینان را حاصل می‌کند که سوخت در سریع‌ترین زمان ممکن تبخیر می‌شود و به‌درستی با هوا مخلوط می‌شود. در نتیجه، بازده بهبود می‌یابد. بنابراین، یک مطالعه تجربی در مورد اسپری سوخت مازوت انجام شده است. اثرات دما بر روی اسپری سوخت مورد مطالعه قرار می‌گیرد، زیرا گرانیوی سوخت مازوت بستگی زیادی به دما دارد. از آنجا که قطره‌سازی مازوت موضوعی بحث‌برانگیز است، برای تسهیل مطالعات بیشتر در مورد عملکردهای گازسازی، قطره‌سازی مازوت بررسی شده است. طول شکست و قطر متوسط قطره از مهم‌ترین ویژگی‌های انژکتور است که برای طراحی محفظه گازساز ضروری است. طراحی طول محفظه به طول شکست مایع بستگی دارد و طول عمر تبخیر قطره در محفظه به میانگین قطر قطره مربوط می‌شود. بنابراین، این پارامترها در این مطالعه بررسی شده است.

دیزل به‌عنوان جایگزین مناسبی برای سوخت‌های مازوت و نفت در نظر گرفته می‌شود. همچنین، میزان انتشار آلاینده‌های آن به‌مراتب کمتر از احتراق مازوت است. امروزه استفاده از دیزل بیشتر در موتورهای احتراق داخلی دیده می‌شود. هدف از این مطالعه بررسی قطره‌شدن سوخت‌های مازوت و دیزل، به‌منظور گازسازی و استفاده در نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌ها، تولید توان (برق)، تولید محصولات شیمیایی مختلف (مانند متانول، اتانول و آمونیاک) و دیگ‌های بخار، برای موتورهای بخار است. همچنین، در این مطالعه، روش‌های اندازه‌گیری تجربی و عددی برای تعیین خصوصیات قطره‌سازی و پیش‌بینی رفتار پاشش سوخت‌های واقعی و کاربردی ایجاد شده است.

ImageJ نرم‌افزاری قدرتمند و کاربردی برای تجزیه و تحلیل تصویر است که برای پردازش تصاویر اسپری استفاده می‌شود. ابتدا، تصویر بر روی نرم‌افزار بارگذاری می‌شود و سپس از منوی Analyze، تنظیم مقیاس تصویر انجام می‌شود (Analyze → set scale). عکس رنگی به تصویر خاکستری تبدیل می‌شود (Image → Type → 8-bit) و نویز آن حذف می‌شود (Process → Noise → Despeckle). سرانجام، به‌منظور تعیین طول شکست پاشش، زاویه و طول موج پاشش، عکس با استفاده از روش Otsu به تصویر باینری تبدیل می‌شود (Process → Binary → Make Binary). همچنین، قطر قطره با استفاده از منوی تجزیه و تحلیل ذرات (Analyze → Analyze particles) اندازه‌گیری می‌شود تا قطر متوسط ساتر (SMD) به‌دست آید.

سطح نشان داده‌شده ذرات در شکل ۵-۱۲ توسط نرم‌افزار ImageJ اندازه‌گیری می‌شود و سپس با فرض کروی بودن قطرات، قطر قطرات محاسبه می‌شود. نمونه‌ای از پردازش تصویر با نرم‌افزار ImageJ در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. همه این مراحل پردازش تصویر برای به‌دست‌آوردن طول شکست، زاویه پاشش، طول موج و SMD برای تمامی تصاویر ثبت‌شده در هر مرحله از فشار و دمای تزریق انجام شده و میانگین آن‌ها گزارش می‌شود.

برای اندازه‌گیری هر پارامتر، مراحل آزمایش چندین بار تکرار شده است تا خطاهای اندازه‌گیری به حداقل برسد و از تکرار نتایج اطمینان حاصل شود. به‌منظور اطمینان از کیفیت اندازه‌گیری‌های تجربی، درصد عدم قطعیت هر پارامتر در جدول ۲ گزارش شده است.

بررسی نتایج

نرخ جرمی جریان

نرخ جرمی جریان انژکتورهای فشاری-پیچشی تابعی از اختلاف فشار است. همچنین، کیفیت اسپری سوخت سنگین تابعی از دمای سوخت و فشار تزریق است. شکل ۵ نرخ جرمی جریان انژکتور را در فشارها و دماهای مختلف نشان می‌دهد. شکل ۹ براساس اندازه‌گیری‌های تجربی ترسیم شده است.

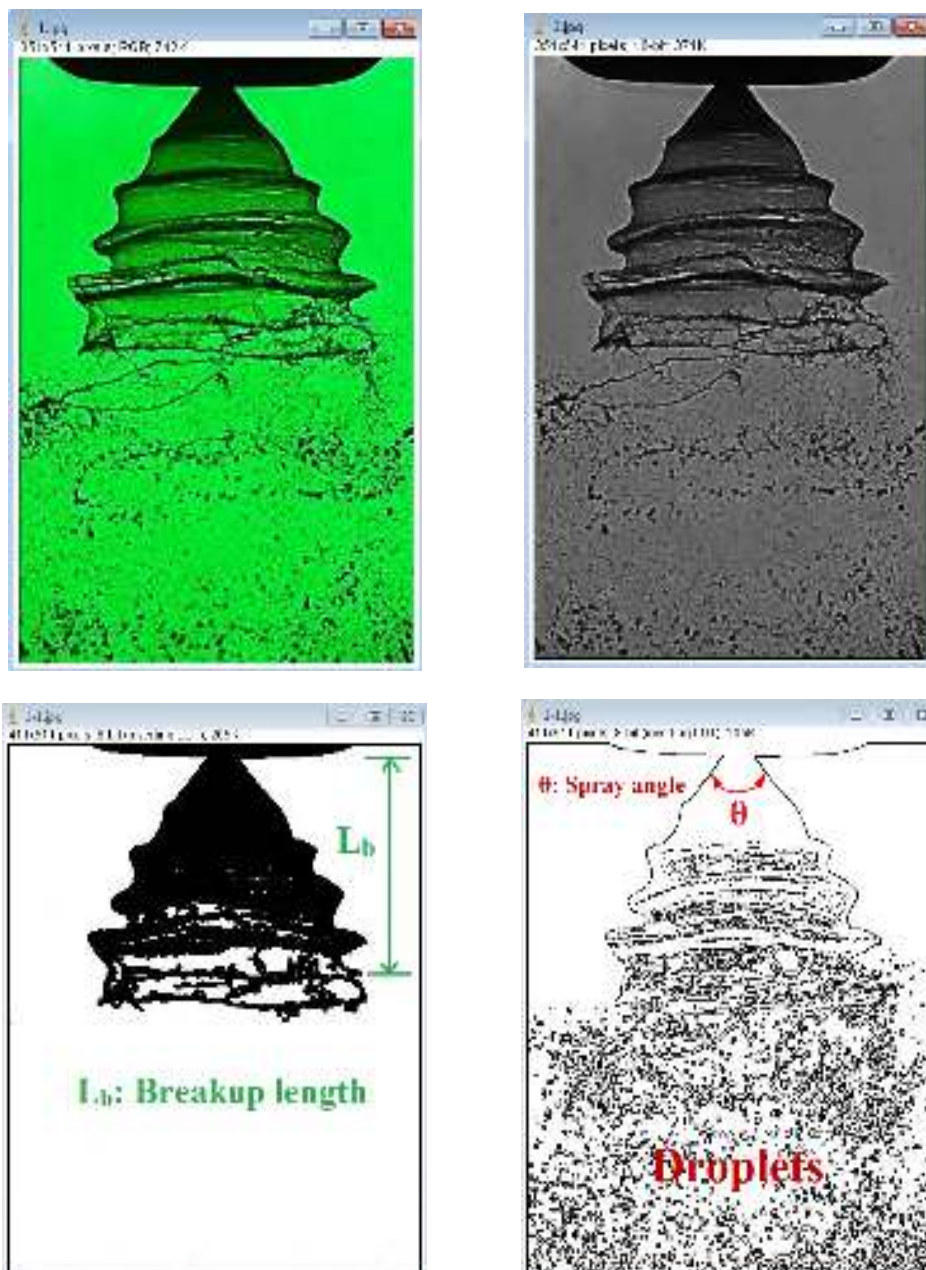


Figure 7- Processing of image to obtain breakup length and angle by ImageJ software
 شکل ۷- پردازش تصویر توسط نرم‌افزار ImageJ به‌منظور به‌دست‌آوردن طول شکست و زاویه پاشش

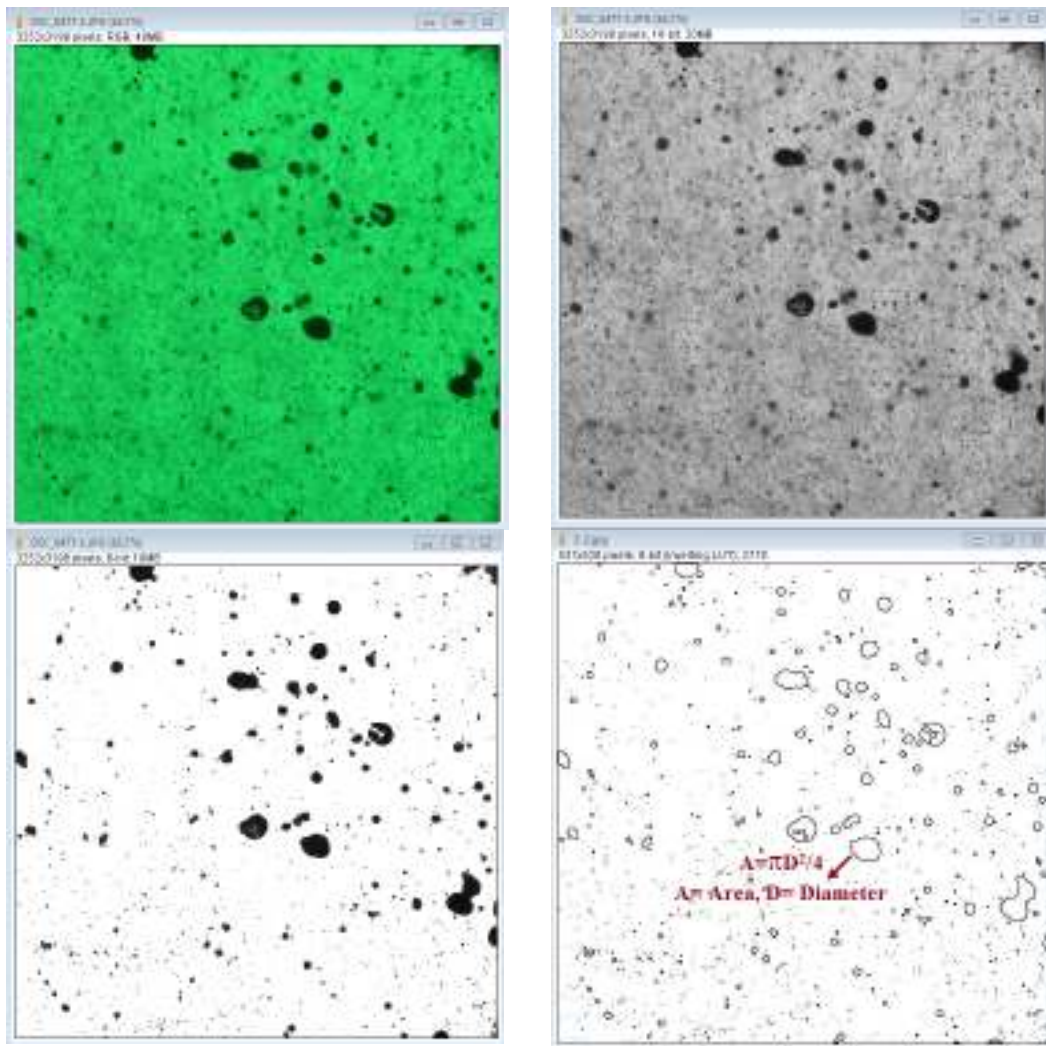


Figure 8- Processing of image to obtain SMD by ImageJ software
 شکل ۸- پردازش تصویر توسط نرم افزار ImageJ به منظور تعیین SMD

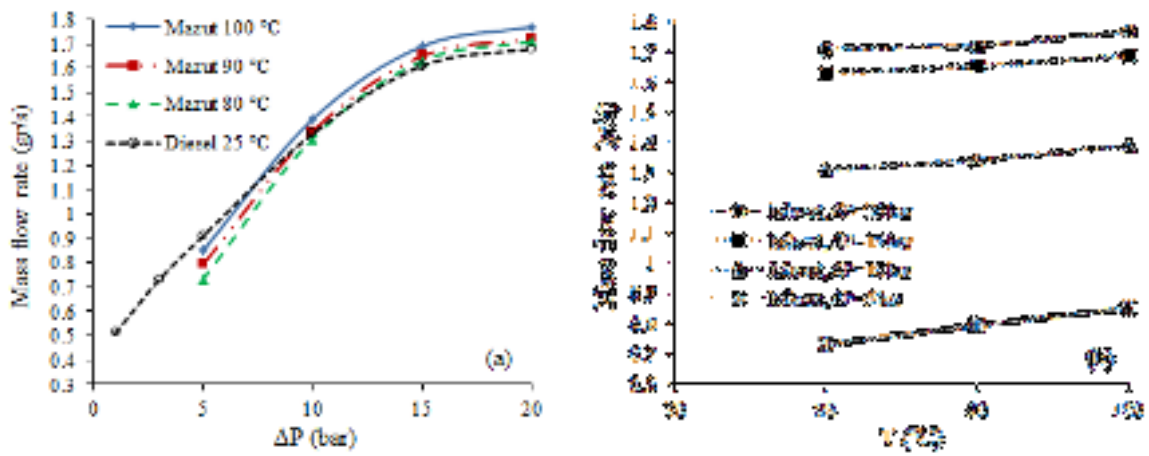


Figure 9- The rate of mass flow (a- in terms of pressure difference (bar), b-in terms of temperature (°C)
 شکل ۹- نرخ جرمی جریان، الف) برحسب اختلاف فشار (بار)، ب) برحسب دما (سانتی گراد)

شکل ۹ نشان می‌دهد که هرچه فشار و دما بیشتر شود، نرخ جریان جرم سوخت بیشتر می‌شود. شکل ۹-a نشان می‌دهد که با افزایش فشار، شیب افزایشی نرخ جریان جرم کاهش می‌یابد و نرخ جریان جرم به مقدار مشخصی می‌رسد. سوخت مازوت چگال‌تر از سوخت دیزل است، پس سوخت مازوت سنگین‌تر از سوخت دیزل در یک حجم یکسان است. بنابراین، شکل ۹-a نشان می‌دهد که با افزایش فشار، نرخ جریان جرم سوخت دیزل کمتر از نرخ جریان جرم سوخت مازوت است. شکل ۹-b نشان می‌دهد که با افزایش دمای سوخت، نرخ جریان جرم با یک شیب تقریباً ثابت افزایش می‌یابد. اختلاف نرخ جریان جرم سوخت مازوت در فشارهای بالاتر (۱۵ و ۲۰ بار) کمتر از اختلاف نرخ جریان جرم سوخت مازوت در فشارهای پایین‌تر (۵ و ۱۰ بار) در یک دمای یکسان است. در جدول ۳، میزان نرخ جریان جرمی اندازه‌گیری شده به صورت کمی مشاهده می‌شود.

جدول ۳- میزان نرخ جریان جرمی اندازه‌گیری شده

Table 3- The measured mass flow rate

	Diesel (25 °C)				Mazut (100 °C)				Mazut (90 °C)			Mazut (80 °C)						
	$\Delta P=1$ bar	$\Delta P=3$ bar	$\Delta P=5$ bar	$\Delta P=10$ bar	$\Delta P=15$ bar	$\Delta P=20$ bar	$\Delta P=5$ bar	$\Delta P=10$ bar	$\Delta P=15$ bar	$\Delta P=20$ bar	$\Delta P=5$ bar	$\Delta P=10$ bar	$\Delta P=15$ bar	$\Delta P=20$ bar				
\dot{m} (gr/s) (Experimental)	0.51	0.73	0.91	1.33	1.61	1.68	0.85	1.39	1.69	1.77	0.79	1.34	1.65	1.72	0.73	1.31	1.63	1.71

زاویه مخروط اسپری

تشکیل مخروط اسپری یک فرایند تصادفی است. زاویه پاشش (θ) در سیستم‌های احتراق به‌ویژه در محفظه احتراق یک پارامتر بسیار مهم است. در محفظه احتراق توربین گاز، اثر زاویه پاشش بر عملکرد سیستم اشتعال مهم است. این پارامتر تأثیر زیادی در بازده عملکرد، محدوده خاموشی شعله و انتشار شعله دارد. زاویه پاشش بر روی مخلوط‌شدن سوخت و اکسیدکننده در صفحه انژکتور تأثیر دارد. بنابراین، شناسایی زاویه پاشش ضروری است. مقدار زاویه پاشش به برخی پارامترها مانند گرانشی سیال و هندسه انژکتور بستگی دارد. زاویه پاشش بیشتر به صورت تجربی اندازه‌گیری می‌شود. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که تغییرات زاویه پاشش محدود و به یک مقدار حداکثر همگراست [۱].

شکل‌های ۱۰-a و ۱۰-b نشان می‌دهد که با افزایش فشار تزریق و دمای سوخت، زاویه مخروط اسپری افزایش می‌یابد (تغییر زاویه مخروط اسپری در دماهای پایین و فشارهای تزریق پایین بیشتر قابل مشاهده است). به طور کلی، با افزایش فشار یا دمای سوخت، اثر گرانشی سوخت کاهش می‌یابد. بنابراین، هسته مرکزی هوا سریع‌تر تشکیل می‌شود و قطر هسته هوا سریع‌تر رشد می‌کند. در نتیجه، زاویه مخروط اسپری افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر فشار و دمای سوخت، هنگامی که هسته مرکزی هوا کاملاً توسعه یافته است، زاویه پاشش تقریباً ثابت می‌ماند و مخروط اسپری کامل تشکیل می‌شود. زاویه اسپری سوخت مازوت در دما و فشار زیاد نزدیک به زاویه اسپری پاشش سوخت دیزل در فشار زیاد است. در جدول ۴، مقدار زاویه مخروط اسپری اندازه‌گیری شده به صورت کمی دیده می‌شود.

جدول ۴- مقدار زاویه مخروط اسپری اندازه‌گیری شده

Table 3- The measured spray cone angle

	Diesel (25 °C)				Mazut (100 °C)				Mazut (90 °C)			Mazut (80 °C)						
	$\Delta P=1$ bar	$\Delta P=3$ bar	$\Delta P=5$ bar	$\Delta P=10$ bar	$\Delta P=15$ bar	$\Delta P=20$ bar	$\Delta P=5$ bar	$\Delta P=10$ bar	$\Delta P=15$ bar	$\Delta P=20$ bar	$\Delta P=5$ bar	$\Delta P=10$ bar	$\Delta P=15$ bar	$\Delta P=20$ bar				
θ (degree) (Experimental)	75	78	80	83	85	86	75	78	79	80	74	77	78	80	30	50	60	70

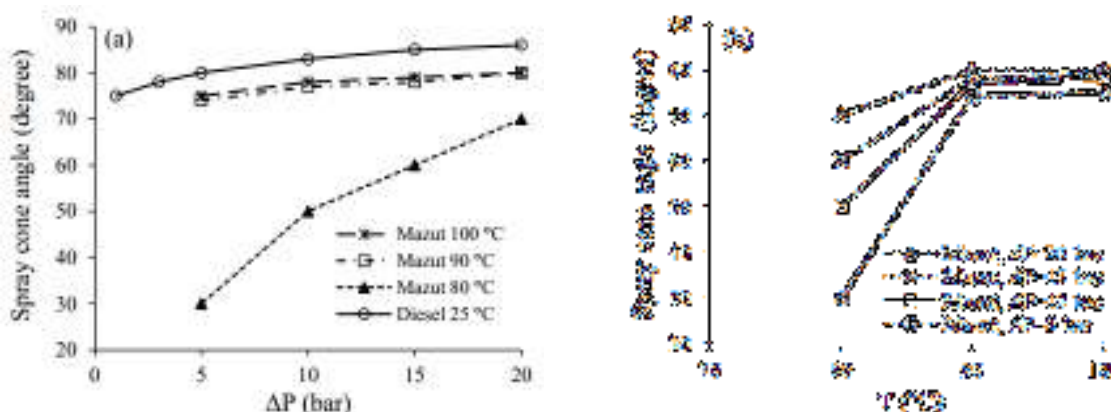


Figure 10- Spray cone angle changes (a- in terms of pressure difference (bar), b-in terms of temperature (°C)
 شکل ۱۰- تغییرات زاویه مخروط اسپری، الف) بر حسب اختلاف فشار (بار)، ب) بر حسب دما (سانتی گراد)

طول شکست اولیه

طول شکست اولیه فاصله‌ای است که در آن جرم جت اصلی خروجی از انژکتور یا فیلم مایع کاملاً از هم پاشیده می‌شود. این فاصله در طراحی محفظه احتراق و تعیین مرز شعله مهم است. نفوذ زیاد اسپری باعث برخورد سوخت با دیواره محفظه و اتلاف سوخت می‌شود.

معادله نیمه تجربی (۱۸) توسط هان و همکاران [۲۷] برای تعیین طول شکست فیلم مخروطی مایع ارائه شده است. همچنین، فو و همکاران [۲۸] و اینامورا و همکاران [۲۹] از معادله (۱۸) برای تعیین طول شکست فیلم مایع مخروطی استفاده کرده‌اند.

$$L_b = C \left[\frac{\rho_l \sigma \ln \left(\frac{\eta_{bu}}{\eta_0} \right) h \cos \left(\frac{\theta}{2} \right)}{\rho_g^2 U^2} \right]^{0.5} \quad (18)$$

در معادله (۱۸)، C یک ثابت تجربی است. η_{bu} دامنه بحرانی اغتشاش موج را در محل شکست فیلم مایع نشان می‌دهد و η_0 دامنه اولیه اغتشاش موج بر روی سطح فیلم مایع است. در این مطالعه مقدار C و $\ln \left(\frac{\eta_{bu}}{\eta_0} \right)$ به ترتیب ۰/۸۲ و ۱۲ در نظر گرفته شده است.

شکل a-۱۱ تقریب خوبی بین نتایج تجربی و تئوری برای طول شکست نشان می‌دهد. در اختلاف فشارهای کمتر از ۱۰ بار، تفاوت آشکاری بین نتایج تجربی و تئوری وجود دارد، اما در اختلاف فشارهای بیشتر از ۱۰ بار، نتایج تجربی و تئوری به هم نزدیک‌ترند. همچنین، تفاوت بین نتایج تجربی و تئوری برای مایعات با گرانروی بالاتر بیشتر از تفاوت بین نتایج تجربی و تئوری برای مایعات با گرانروی پایین‌تر است. با کاهش گرانروی در فشار ثابت یا افزایش فشار در دمای ثابت، نرخ رشد موج افزایش می‌یابد. بنابراین، همان‌طور که در شکل‌های a-۱۱ و b-۱۱ نشان داده شده است، ورقه مایع زودتر می‌شکند. افزایش سرعت باعث ایجاد اغتشاشات قوی‌تر با دامنه بزرگ‌تر بر روی صفحه مایع می‌شود که سبب می‌شود صفحه مایع پیوسته سریع‌تر شکسته شود. بنابراین، اگر نیروی تکانه سیال افزایش یابد و یا نیروی گرانروی سیال کاهش یابد، طول شکست سیال کوتاه‌تر می‌شود.

جدول ۵ طول شکست تجربی را با طول شکست به دست آمده از رابطه (۱۸) مورد مقایسه قرار می‌دهد و درصد خطا را گزارش می‌کند. در فشارهای پایین در عمل دامنه اغتشاشات موج بر روی سطح مایع کمتر از فشارهای بالاست و با تغییرات فشار، دما و دیگر شرایط تاثیرگذار بر اسپری سوخت، مقدار این دامنه اغتشاش موج تغییر می‌کند، درحالی که این تغییرات در رابطه (۱۸)، که برای شرایط بهینه و قطره‌شدگی کامل اسپری مایع ارائه شده، لحاظ نشده است و این دلیل وجود درصد خطای ایجاد شده است.

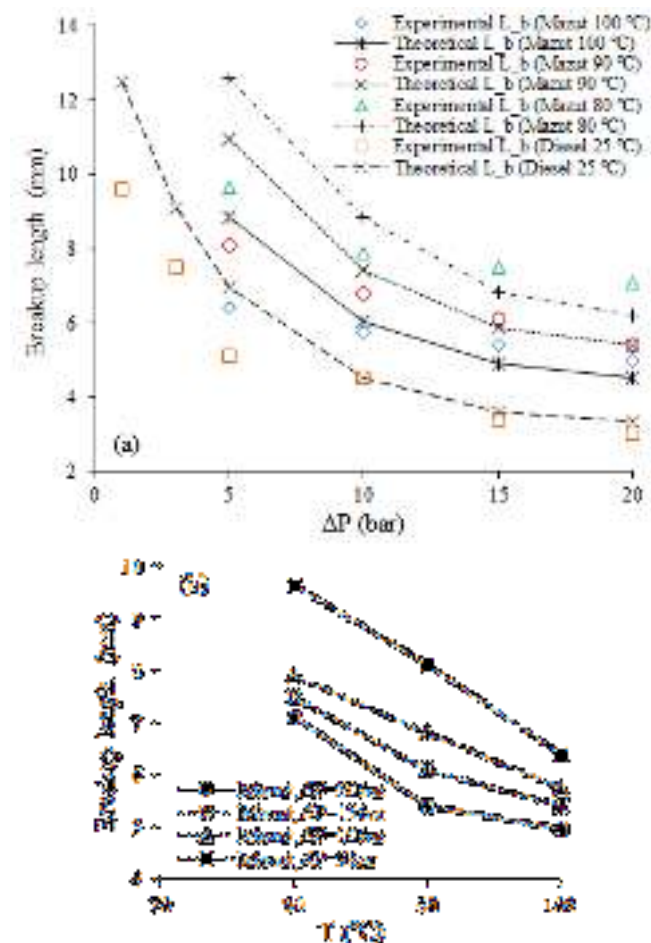


Figure 11- Breakup length changes (a- in terms of pressure difference (bar), b-in terms of temperature (°C)
 شکل ۱۱- تغییرات طول شکست، (الف) بر حسب اختلاف فشار (بار)، (ب) بر حسب دما (سانتی‌گراد)

جدول ۵- درصد خطای میزان طول شکست تجربی و تئوری

Table 5- Percentage error of experimental and theoretical breakup length

	Diesel (25 °C)				Mazut (100 °C)			Mazut (90 °C)			Mazut (80 °C)								
	ΔP=1 bar	ΔP=3 bar	ΔP=5 bar	ΔP=10 bar	ΔP=5 bar	ΔP=10 bar	ΔP=15 bar	ΔP=5 bar	ΔP=10 bar	ΔP=15 bar	ΔP=5 bar	ΔP=10 bar	ΔP=15 bar	ΔP=20 bar					
L_b (mm) (Experimental)	9.6	7.5	5.1	4.5	3.38	3.02	3.02	6.4	5.74	5.4	4.97	8.1	6.8	6.1	5.4	9.65	7.9	7.5	7.1
L_b (mm) (Theoretical)	12.52	9.11	6.95	4.52	3.61	3.34	3.34	8.84	6.04	4.9	4.5	10.97	7.43	5.87	5.42	12.59	8.86	6.83	6.2
% Error	23.32	17.67	26.62	0.44	6.37	9.58	9.58	27.60	4.97	10.20	10.44	26.16	8.48	3.92	0.37	23.35	10.84	9.81	14.52

قطر متوسط

یکی از مهم‌ترین پارامترهای قطره‌سازی مایع قطر متوسط ساتر $(D_{32} = SMD = \frac{\sum_{i=1}^n N_i D_i^3}{\sum_{i=1}^n N_i D_i^2})$ است. قطر قطره تأثیر مستقیمی بر بازده احتراق و تشکیل آلاینده‌ها دارد.

قطر متوسط ساتر تجربی با قطر متوسط ساتر به دست آمده از همبستگی رادکلیف [۳۰] در شکل ۱۲-a مقایسه می شود. همان طور که در شکل ۱۲-b نشان داده شده است، قطر متوسط ساتر تجربی حاصل از سوخت مازوت در فشارهای بالاتر (۱۵ و ۲۰ بار) نزدیک به قطر متوسط ساتر حاصل از همبستگی رادکلیف است. با کاهش فشار، اختلاف بین قطر متوسط ساتر تجربی و نظری برای سوخت مازوت افزایش می یابد. همچنین، اختلاف بین قطر متوسط ساتر تجربی و نظری با افزایش دمای سوخت مازوت افزایش می یابد. تفاوت بین قطر متوسط ساتر تجربی و نظری برای سوخت دیزل با افزایش فشار افزایش می یابد. شکل های ۱۲-a و ۱۲-b نشان می دهند که قطر متوسط ساتر با افزایش دما و فشار برای سوخت مازوت کاهش می یابد. سوخت دیزل قطر متوسط ساتر کمتری نسبت به سوخت مازوت در همان فشار دارد، زیرا گرانی سوخت دیزل کمتر از سوخت مازوت است. با افزایش دما و فشار سوخت، تغییرات قطر متوسط ساتر کاهش می یابد و هنگامی که قطره شدن کامل اتفاق می افتد، تغییرات قطر متوسط ساتر کم می شود.

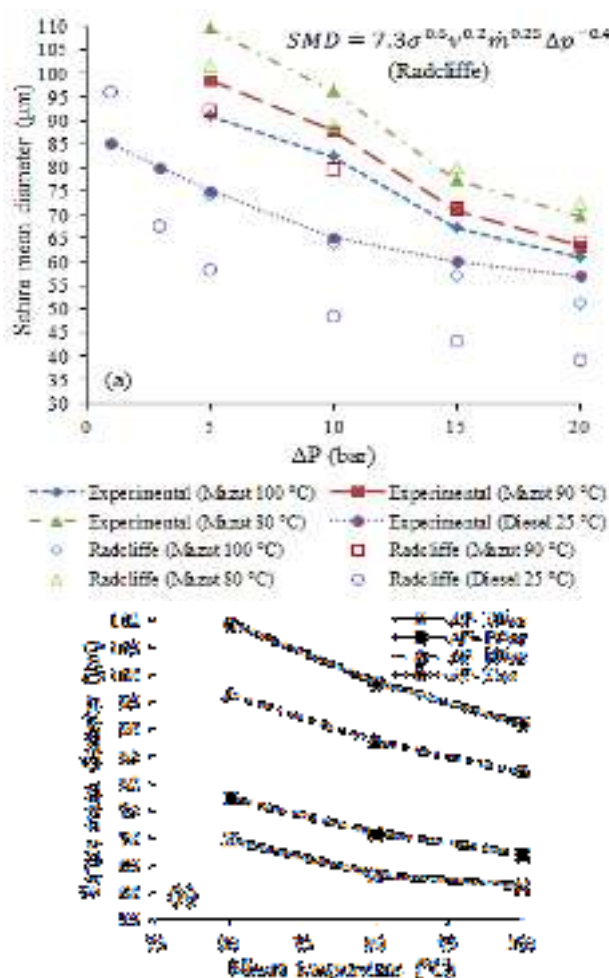


Figure 12- Sature mean diameter changes (a- in terms of pressure difference (bar), b-in terms of temperature (°C)
 شکل ۱۲- تغییرات قطر متوسط ساتر، الف) بر حسب اختلاف فشار (بار)، ب) بر حسب دما (سانتی گراد)

مقادیر قطر متوسط ساتر تجربی و تئوری به همراه درصد خطاها در جدول ۶ ارائه شده است. برای سوخت دیزل در فشارهای بالاتر، قطر ذرات بسیار کوچک تر می شوند و روند شناسایی و اندازه گیری تجربی آنها به مراتب سخت تر می شود. به همین دلیل، افزایش درصد خطا بین مقادیر تجربی و تئوری قطر متوسط ذرات در فشارهای بالاتر اتفاق می افتد. هرچه مازوت به سمت دماهای

پایین تر می‌رود، به خاطر قطر ذرات بزرگ‌تر تولیدشده، ثبت تصاویر قطرات و اندازه‌گیری قطر آن‌ها راحت‌تر بوده و درصد خطای بین مقادیر تجربی و تئوری کاهش می‌یابد.

جدول ۶- درصد خطای میزان قطر متوسط تجربی و تئوری

Table 6- Percentage error of experimental and theoretical mean diameter

	Diesel (25 °C)						Mazut (100 °C)				Mazut (90 °C)				Mazut (80 °C)			
	$\Delta P=1$ bar	$\Delta P=3$ bar	$\Delta P=5$ bar	$\Delta P=10$ bar	$\Delta P=15$ bar	$\Delta P=20$ bar	$\Delta P=5$ bar	$\Delta P=10$ bar	$\Delta P=15$ bar	$\Delta P=20$ bar	$\Delta P=5$ bar	$\Delta P=10$ bar	$\Delta P=15$ bar	$\Delta P=20$ bar	$\Delta P=5$ bar	$\Delta P=10$ bar	$\Delta P=15$ bar	$\Delta P=20$ bar
SMD (μm) (Experimental)	85.18	80.01	75.11	65.24	60.19	57.01	91.12	82.32	67.17	61.12	98.64	87.75	70.89	63.31	109.53	96.33	77.45	69.67
SMD (μm) (Theoretical)	96	67.67	58.29	48.57	43.32	39.02	74	64	57	51.2	92.2	79.7	71.4	64.3	101.55	89	79.94	72.11
% Error	11.27	18.24	28.86	34.32	38.94	46.10	23.14	28.63	17.84	19.38	6.98	10.10	0.71	1.54	7.86	8.24	3.11	3.38

ارتباط میان عدد رینولدز، وبر و آنسرگ

عدد رینولدز ($Re = \frac{\rho_l U d_o}{\mu_l}$)، عدد وبر ($We_l = \frac{\rho_l U^2 d_o}{\sigma}$) و عدد آنسرگ ($Oh = \frac{\sqrt{We_l}}{Re} = \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l \sigma d_o}}$) سه پارامتر بی‌بعد مهم در جریان سیالاتند. رفتار این پارامترها نسبت به همدیگر برای سوخت‌های مازوت و دیزل در فشارها و دماهای مختلف بررسی شده است. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که عدد آنسرگ رابطه‌ای توانی با عدد رینولدز برای سوخت مازوت در فشار ثابت و دماهای مختلف دارد. عدد آنسرگ با تغییرات رینولدز برای یک سوخت در دمای ثابت دستخوش تغییرات نخواهد شد. به عبارتی دیگر، از آنجایی که تغییرات فشار تاثیر یکسانی بر روی تغییرات رینولدز و وبر دارد، عدد آنسرگ تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

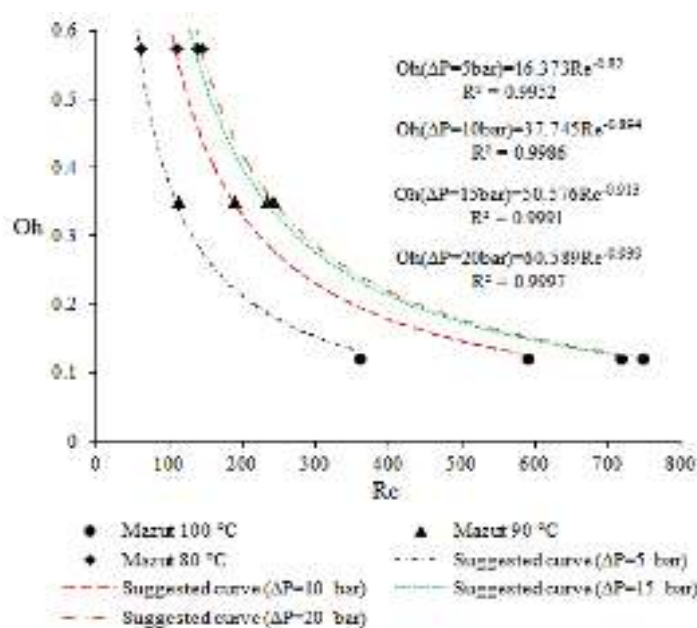


Figure 13- The changes in Ohnesorge number in terms of Reynolds number for Mazut fuel
 شکل ۱۳- تغییرات عدد آنسرگ برحسب عدد رینولدز برای سوخت مازوت

شکل ۱۴ نشان می‌دهد که عدد وبر مایع رابطه‌ای توانی با عدد رینولدز برای سوخت مازوت در دمای ثابت و فشارهای مختلف دارد. همچنین، عدد وبر مایع رابطه‌ای لگاریتمی با عدد رینولدز برای سوخت مازوت در فشار ثابت و دماهای مختلف دارد. شکل ۱۵ نشان می‌دهد که عدد وبر مایع رابطه‌ای توانی با عدد رینولدز برای سوخت دیزل در دمای ثابت و فشارهای مختلف دارد. همچنین، عدد آنسبرگ با تغییرات رینولدز برای سوخت دیزل در دمای ثابت تغییر نخواهد کرد.

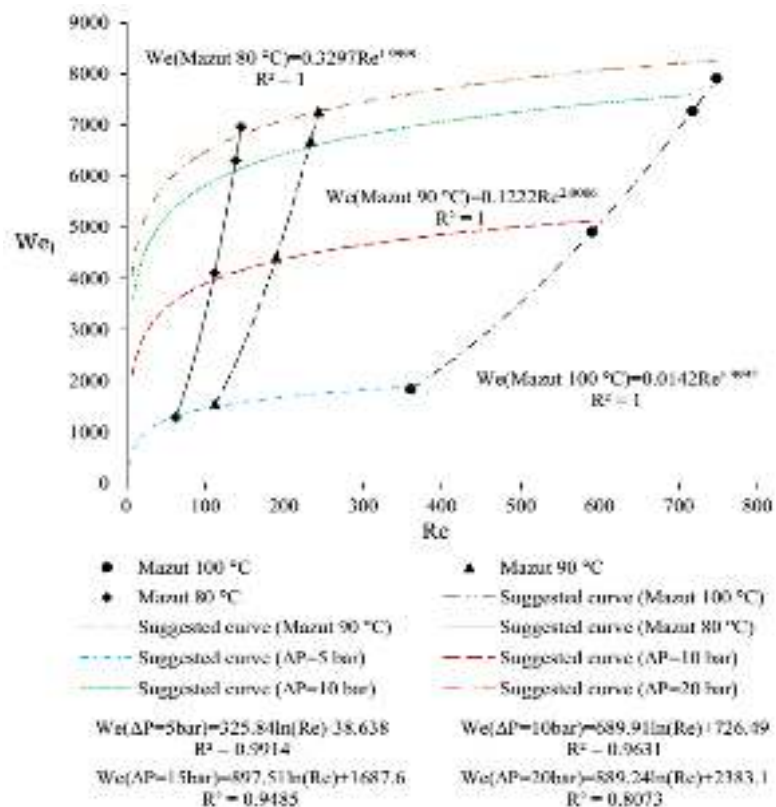


Figure 14- The changes in liquid Weber number in terms of Reynolds number for Mazut fuel

شکل ۱۴- تغییرات عدد وبر مایع برحسب عدد رینولدز برای سوخت مازوت

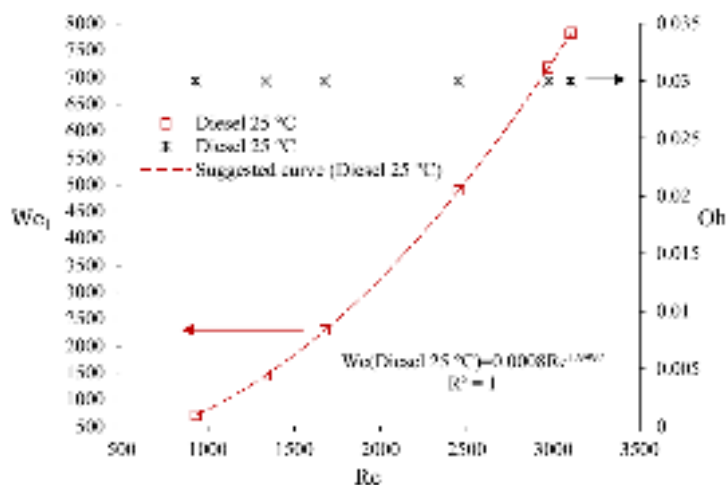


Figure 15- The changes in liquid weber number and Ohnesorge number in terms of Reynolds number for diesel fuel

شکل ۱۵- تغییرات عدد وبر مایع و عدد آنسبرگ برحسب عدد رینولدز برای سوخت دیزل

توزیع قطر و سرعت قطرات

نتایج اصل بیشینه آنتروپی با توزیع تجربی مقایسه می‌شود تا اثر گرانیوی، دما و فشار بر تابع توزیع بررسی شود. نتایج توزیع تجربی اندازه قطرات سوخت مازوت و دیزل با نتایج توزیع عددی مطابقت خوبی دارد. شکل‌های ۱۶ و ۱۷ توزیع اندازه و سرعت قطرات را برحسب قطر و سرعت قطرات برای سوخت مازوت و سوخت دیزل در دما و فشارهای مختلف نشان می‌دهند.

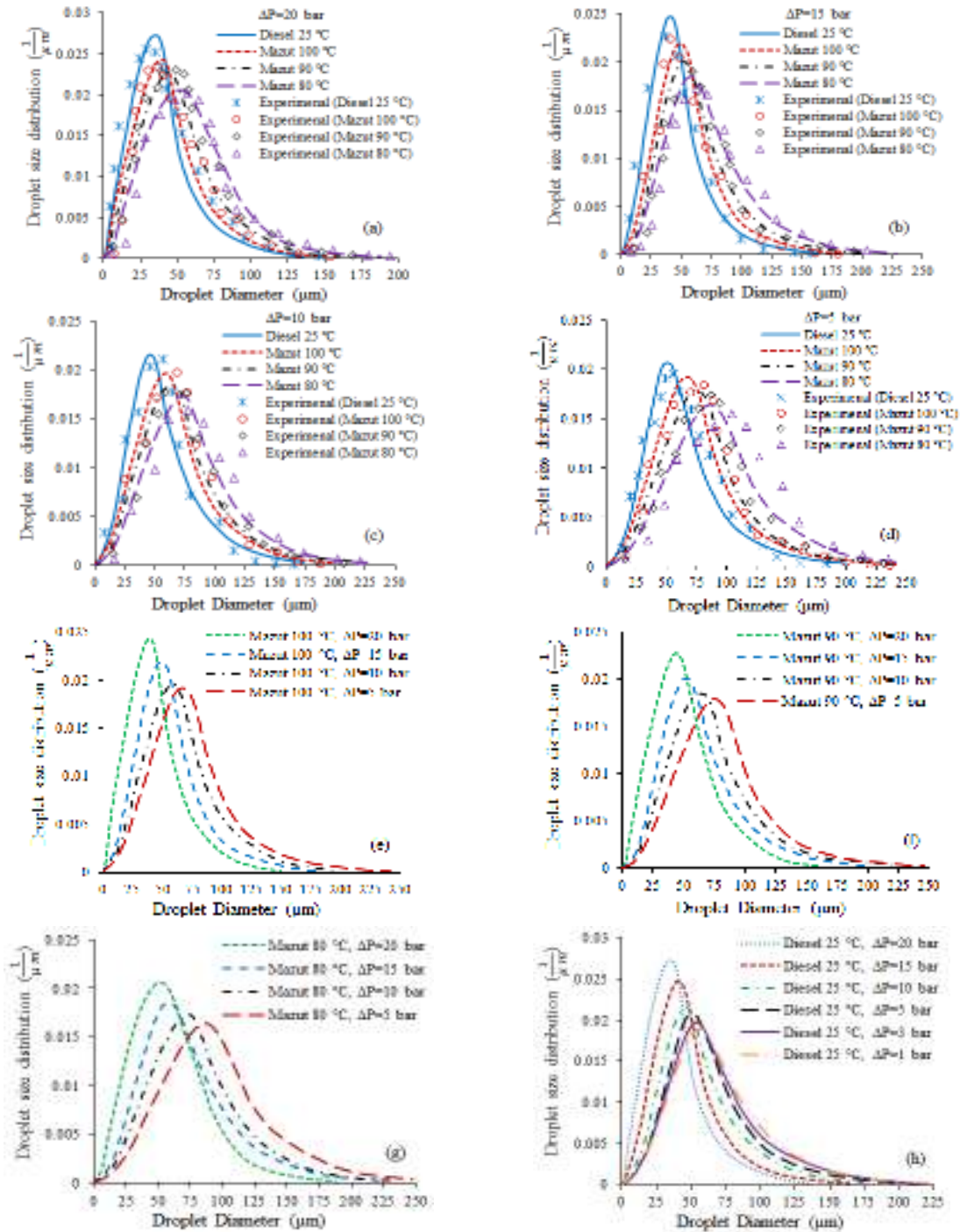


Figure 16- The changes in droplet size distribution

شکل ۱۶- تغییرات توزیع اندازه قطرات

شکل‌های ۱۶-a تا ۱۶-d نشان می‌دهند که با افزایش دما و فشار سوخت مازوت، توزیع قطر قطرات باریک‌تر و بلندتر می‌شود. سوخت مازوت دارای گرانروی بسیار بالاتری نسبت به سوخت دیزل است. همچنین، با افزایش دمای سوخت مازوت، گرانروی آن کاهش می‌یابد. در شرایط یکسان، مازوت دارای قطرات بزرگ‌تری از دیزل است. بنابراین، توزیع اندازه قطر با افزایش گرانروی مایع مسطح‌تر و یکنواخت‌تر می‌شود. بنابراین، سوخت مازوت توزیع قطر یکنواخت‌تری نسبت به سوخت دیزل در شرایط یکسان دارد. شکل‌های ۱۶-e تا ۱۶-g نشان می‌دهند که با کاهش فشار سوخت مازوت در دمای ثابت، توزیع اندازه قطرات آن تخت‌تر و یکنواخت‌تر می‌شود. همچنین، شکل ۱۶-h نشان می‌دهد که توزیع قطر سوخت دیزل با کاهش فشار یکنواخت‌تر می‌شود.

شکل‌های ۱۷-a تا ۱۷-d نشان می‌دهند که با کاهش دما و فشار سوخت مازوت، توزیع سرعت قطرات باریک‌تر و بلندتر می‌شود. در شرایط یکسان، سوخت دیزل قطره کوچک‌تری نسبت به مازوت دارد. پس، سرعت قطرات دیزل در شرایط مشابه بیشتر از مازوت است. بنابراین، سوخت دیزل توزیع سرعت مسطح‌تر و یکنواخت‌تری نسبت به سوخت مازوت در همان شرایط دارد. به‌طور کلی، توزیع سرعت قطرات با کاهش گرانروی مایع تخت‌تر و یکنواخت‌تر می‌شود. شکل‌های ۱۷-e تا ۱۷-g نشان می‌دهند که با افزایش فشار سوخت مازوت در دمای ثابت، توزیع سرعت قطرات آن تخت‌تر و یکنواخت‌تر می‌شود. همچنین، شکل ۱۷-h نشان می‌دهد که توزیع سرعت سوخت دیزل با افزایش فشار، یکنواخت‌تر می‌شود.

قطره‌سازی پدیده‌ای تصادفی و وابسته به عوامل مختلفی چون شرایط محیط، شرایط آزمایش، هندسه انژکتور و خواص سیال است. دو سیال نفتی ارزان و پرکاربرد با گرانروی‌ای کاملاً متفاوت برای مقایسه نتایج پارامترهای قطره‌سازی و درک بهتر رفتار اسپری آن‌ها در شرایط مختلف مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. زاویه مخروط اسپری، طول شکست، قطر متوسط قطرات، توزیع اندازه و سرعت قطرات هر سوخت از جمله پارامترهایی‌اند که به‌راحتی قابل پیش‌بینی نبوده و توسط آزمایش در فشارها و دماهای مختلف به‌دست می‌آیند. این امر که گرانروی سوخت دیزل به‌مراتب پایین‌تر از سوخت مازوت است و بنابراین در مقایسه، سوخت دیزل خصوصیات پاششی بهتری از مازوت دارد تقریباً بدیهی است. ذکر این نکته لازم است که اطلاعاتی بسیار مهم، شامل این موارد که هر کدام از این سوخت‌ها چه رفتار پاششی و چه مشخصات قطره‌شدگی دارند و مقدار آن‌ها به چه میزان است و چگونه به‌دست می‌آیند و توزیع اندازه و سرعت قطرات آن‌ها به چه میزان و به چه صورت است، نیازمند تست‌ها و اندازه‌گیری‌های تجربی، ابزارهای تجربی و نرم‌افزارهای محاسباتی است. همین اندازه‌های به‌دست‌آمده از نتایج تجربی و عددی در طراحی محفظه احتراق، تعیین بازده محفظه احتراق، شبیه‌سازی احتراق سوخت و همچنین تعیین میزان انتشار آلاینده‌ها بسیار حائز اهمیت است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، پاشش سوخت مازوت و پاشش سوخت دیزل در دما و فشارهای مختلف به‌صورت تجربی بررسی شده است. تصاویر اسپری سوخت توسط روش سایه‌نگاری ثبت شده و سپس با روش پردازش تصویر تجزیه و تحلیل شده است. نتایج تجربی با نتایج نظری مقایسه می‌شوند و همچنین مشخصات اسپری سوخت برحسب فشار و دما رسم شده‌اند. اثر گرانروی، اثر دما و اثر فشار بر روی توزیع سرعت قطره و توزیع اندازه قطر به‌صورت عددی توسط مدل پیشینه آنتروپی بررسی شده است. همچنین، توزیع اندازه قطرات سوخت مازوت و دیزل به‌طور تجربی محاسبه شده و با نتایج عددی مقایسه شده است.

مطالعات محدودی در رابطه با اسپری سوخت‌های سنگین و غیرنیوتنی انجام شده است و اکثر مطالعات صورت‌گرفته در این زمینه شامل سیال‌های سبک و نیوتنی است. به همین علت، برای نوآوری در این پژوهش تلاش شده است تا روش‌های تجربی و عددی، به‌منظور اندازه‌گیری پارامترهای قطره‌شوندگی یک سوخت غیرنیوتنی سنگین نفتی به نام مازوت و یک سوخت سبک نفتی به نام دیزل و همچنین بررسی چگونگی رفتار اسپری این سوخت‌ها و تلاش برای پیش‌بینی توزیع قطره‌شوندگی آن‌ها، توسعه داده شوند. در همین راستا، دستگاه تست سوخت سنگین و سبک نفتی ساخته شد و تجهیزات جانبی آن از جمله اتصالات، گرمکن، حسگرهای دما، فشارسنج‌ها، شیرهای کنترل و غیره نصب و راه‌اندازی شد. از تجهیزات تصویربرداری بسیار

قدرتمندی برای ثبت تصاویر اسپری سوخت‌ها استفاده شد و با آنالیز تصاویر داده‌های مد نظر استخراج شد. در نهایت، از روش تجربی و روش بیشینه آنتروپی برای تحلیل توزیع پراکندگی اندازه و سرعت قطرات اسپری سوخت‌ها استفاده شد.

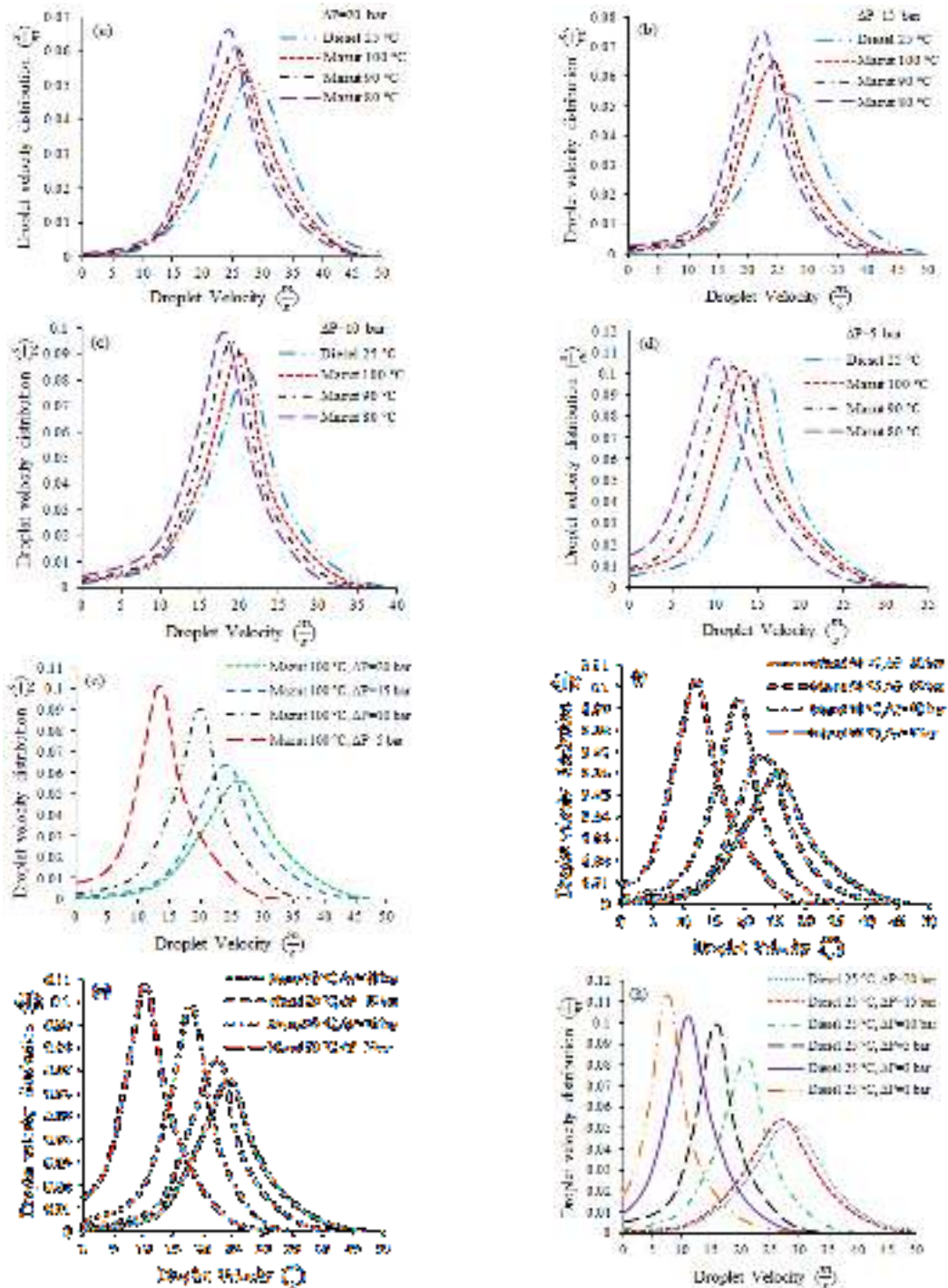


Figure 17- The changes in droplet velocity distribution

شکل ۱۷- تغییرات توزیع سرعت قطرات

به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دما باعث کاهش گرانروی سیال سوخت می‌شود. افزایش دما و فشار طول شکست مایع و قطر متوسط را کاهش می‌دهد. همچنین، با افزایش دما و فشار، زاویه پاشش مایع افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر

دما و فشار، در نهایت میزان طول شکست سوخت به سمت صفر میل می‌کند و مقدار زاویه پاشش به یک مقدار ثابت می‌رسد. گرانروی سوخت مازوت بسیار بیشتر از سوخت دیزل است. بنابراین، زاویه پاشش سوخت مازوت کمتر از سوخت دیزل است. همچنین، طول شکست و قطر متوسط سوخت مازوت بیشتر از سوخت دیزل است. تابع توزیع اندازه قطرات با افزایش گرانروی سیال، کاهش دما و کاهش فشار سیال مسطح‌تر و یکنواخت‌تر می‌شود و تابع توزیع سرعت قطرات با کاهش گرانروی سیال، افزایش دما و افزایش فشار سیال تخت‌تر و یکدست‌تر می‌شود.

دبی جرمی سوخت دیزل از مقدار ۰/۵۱ گرم بر ثانیه تا مقدار ۱/۶۸ گرم بر ثانیه با تغییرات فشار سوخت از ۱ بار تا ۲۰ بار تغییر می‌کند. دبی جرمی سوخت مازوت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد از مقدار ۰/۸۵ گرم بر ثانیه تا مقدار ۱/۷۷ گرم بر ثانیه، دبی جرمی سوخت مازوت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد از مقدار ۰/۷۹ گرم بر ثانیه تا مقدار ۱/۷۲ گرم بر ثانیه و دبی جرمی سوخت مازوت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد از مقدار ۰/۷۳ گرم بر ثانیه تا مقدار ۱/۷۱ گرم بر ثانیه با تغییرات فشار سوخت از ۵ بار تا ۲۰ بار تغییر می‌کند. زاویه مخروط اسپری سوخت دیزل از مقدار ۷۵ درجه تا مقدار ۸۶ درجه با تغییرات فشار سوخت از ۱ بار تا ۲۰ بار تغییر می‌کند. زاویه مخروط اسپری سوخت مازوت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد از مقدار ۷۵ درجه تا مقدار ۸۰ درجه، زاویه مخروط اسپری سوخت مازوت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد از مقدار ۷۴ درجه تا مقدار ۸۰ درجه و زاویه مخروط اسپری سوخت مازوت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد از مقدار ۳۰ درجه تا مقدار ۷۰ درجه با تغییرات فشار سوخت از ۵ بار تا ۲۰ بار تغییر می‌کند. طول شکست سوخت دیزل از مقدار ۹/۶ میلی‌متر تا مقدار ۳/۰۲ میلی‌متر با تغییرات فشار سوخت از ۱ بار تا ۲۰ بار تغییر می‌کند. طول شکست سوخت مازوت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد از مقدار ۶/۴ میلی‌متر تا مقدار ۴/۹۷ میلی‌متر، طول شکست سوخت مازوت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد از مقدار ۸/۱ میلی‌متر تا مقدار ۵/۴ میلی‌متر و طول شکست سوخت مازوت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد از مقدار ۹/۶۵ میلی‌متر تا مقدار ۷/۱ میلی‌متر با تغییرات فشار سوخت از ۵ بار تا ۲۰ بار تغییر می‌کند. قطر متوسط سوخت دیزل از مقدار ۸۵/۱۸ میکرومتر تا مقدار ۵۷/۰۱ میکرومتر با تغییرات فشار سوخت از ۱ بار تا ۲۰ بار تغییر می‌کند. قطر متوسط سوخت مازوت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد از مقدار ۹۱/۱۲ میکرومتر تا مقدار ۶۱/۱۲ میکرومتر، قطر متوسط سوخت مازوت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد از مقدار ۹۸/۶۴ میکرومتر تا مقدار ۶۳/۳۱ میکرومتر و قطر متوسط سوخت مازوت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد از مقدار ۱۰۹/۵۳ میکرومتر تا مقدار ۶۹/۶۷ میکرومتر با تغییرات فشار سوخت از ۵ بار تا ۲۰ بار تغییر می‌کند.

تشکر و قدردانی

از کارمندان آزمایشگاه دانشکده مهندسی هوافضای دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، که همکاری‌های لازم را به عمل آورده‌اند، تشکر می‌شود.

منابع

1. A. H. Lefebvre and V. G. McDonell, *Atomization and sprays*, Second Edition, Florida, CRC press, 2017.
2. S. Som nad S. K. Aggarwal, "Effects of primary breakup modeling on spray and combustion characteristics of compression ignition engines," *Combustion and flame*, 157, 2010, pp. 1179-1193.
3. K. Tagasaki, H. Tajima, M. Nakashima and H. Ishida, "Combustion characteristics of trouble-making bunker fuel oil," *MTZ worldwide*, 63, 2002, pp. 18-20.
4. S. Zhao, Z. Xu, C. Xu and K. H. Chung, "Feedstock characteristic index and critical properties of heavy crudes and petroleum residua," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 41, 2004, pp. 233-242.
5. L. Goldsworthy, "Computational fluid dynamics modelling of residual fuel oil combustion in the context of marine diesel engines," *International Journal of Engine Research*, 7, 2006, pp. 181-199.
6. C. Fink, B. Buchholz, M. Niendorf and H. Harndorf, "Injection spray analyses from medium speed engines using marine fuels," *In Proceedings of the 22nd European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS'08)*, Como Lake, Italy, September 2008.

7. N. Kyriakides, C. Chryssakis and L. Kaiktsis, "Development of a computational model for heavy fuel oil for marine diesel engine applications," *In: 19th Int. Multidimensional Engine Modeling User's Group Meeting at the SAE Congress*, Detroit, April 2009.
8. J. Park, J. H. Jang and S. Park, "Effect of fuel temperature on heavy fuel oil spray characteristics in a common-rail fuel injection system for marine engines," *Ocean Engineering*, 104, 2015, pp. 580-589.
9. M. Guo, N. Shimasaki, K. Nishida, Y. Ogata and Y. Wada, "Experimental study on fuel spray characteristics under atmospheric and pressurized cross-flow conditions," *Fuel*, 184, 2016, pp. 846-855.
10. P. Ghadimi, H. Nowruzi, M. Yousefifard and M. A. Chekab, "A CFD study on spray characteristics of heavy fuel oil-based microalgae biodiesel blends under ultra-high injection pressures," *Meccanica*, 52, 2017, pp. 153-170.
11. R. Shahsavan-Markadeh, *Modeling of gasification of heavy fuel oil droplet*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, 2017. (In Persian)
12. A. Bader, M. Hartwich, A. Richter and B. Meyer, "Numerical and experimental study of heavy oil gasification in an entrained-flow reactor and the impact of the burner concept," *Fuel Processing Technology*, 169, 2018, pp. 58-70.
13. P. Mikaniki, S. M. A. Najafi and H. Ghassemi, "Experimental study of a heavy fuel oil atomization by pressure-swirl injector in the application of entrained flow gasifier," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27, 2019, pp. 765-771.
14. E. Babinsky and P. E. Sojka, "Modeling drop size distributions," *Progress in energy and combustion science*, 28, 2002, pp. 303-329.
15. J. N. Kapur, *Maximum-entropy models in science and engineering*, First Edition, New Jersey, John Wiley & Sons, 1989.
16. R. W. Sellens and T. A. Brzustowski, "A prediction of the drop size distribution in a spray from first principles," *Atomisation Spray Technology*, 1, 1985, pp. 89-102.
17. X. Li and R.S. Tankin, "Droplet size distribution: A derivation of a Nukiyama-Tanasawa type distribution function," *Combustion Science and Technology*, 56, 1987, pp. 65-76.
18. M. Ahmadi and R. W. Sellens, "A simplified maximum-entropy-based drop size distribution," *Atomization and Sprays*, 3, 1993, pp. 291-310.
19. X. Li, L. P. Chin, R. S. Tankin, T. Jackson, J. Stutrud and G. Switzer, "Comparison between experiments and predictions based on maximum entropy for sprays from a pressure atomizer," *Combustion and Flame*, 86, 1991, pp. 73-89.
20. L. P. Chin, P. C. Hsing, R. S. Tankin and T. Jackson "Comparisons between experiments and predictions based on maximum entropy for the breakup of a cylindrical liquid jet," *Atomization and Sprays*, 5, 1995, pp. 603-620.
21. C. Dumouchel, "A New Formulation of the Maximum Entropy Formalism to Model Liquid Spray Drop-Size Distribution," *Particle & Particle Systems Characterization*, 23, 2006, pp. 468-479.
22. S. K. Mitra and X. Li, "A predictive model for droplet size distribution in sprays," *Atomization Sprays*, 9, 1999, pp. 29-50.
23. E. Movahednejad, F. Ommi and S. M. Hosseinalipour, "Prediction of droplet size and velocity distribution in droplet formation region of liquid spray," *Entropy*, 12, 2010, pp. 1484-1498.
24. K. Yan, Z. Ning, M. Lü and C. Sun, "Study on droplet size and velocity distributions of a pressure swirl atomizer based on the Maximum Entropy Formalism," *Entropy*, 17, 2015, pp. 580-593.
25. E. Movahednejad, *Predicting the size and velocity distribution of spray droplets by maximum entropy method using liquid jet primary breakup modeling*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2010. (In Persian)
26. X. Li, M. Li and H. Fu, "Modeling the initial droplet size distribution in sprays based on the maximization of entropy generation," *Atomization Sprays*, 15, 2005, pp. 295-322.
27. Z. Han, S. E. Parrish, P. V. Farrell and R. D. Reitz, "Modeling atomization processes of pressure-swirl hollow-cone fuel sprays," *Atomization sprays*, 7, 1997, pp. 663-684.
28. Q. F. Fu, L. J. Yang, Y. Y. Qu and B. Gu, "Linear stability analysis of a conical liquid sheet," *Journal of Propulsion and Power*, 26, 2010, pp. 955-968.
29. T. Inamura, H. Tamura and H. Sakamoto, "Characteristics of liquid film and spray injected from swirl coaxial injector," *Journal of propulsion and Power*, 19, 2003, pp. 632-639.
30. A. Radcliffe, "Fuel injection," *In: High speed aerodynamics, and jet propulsion*, 1, 1960, pp. 11-84.

English Abstract

Experimental and Numerical Investigation of Atomization characteristics of Diesel and Mazut Fuel injected from a Pressure-Swirl Atomizer

Elyas Rostami¹, Hossein Mahdavy Moghaddam^{2*}

1- Aerospace Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, elyas.rostami@email.kntu.ac.ir

2- Aerospace Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, mahdavy@kntu.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2021.05.02, Received in revised form: 2021.06.15, Accepted: 2021.06.23)

In this research, an attempt has been made to use experimental and numerical methods to measure the powdering parameters of a heavy non-Newtonian oil fuel called Mazut and a light petroleum fuel called diesel, as well as to investigate the spray behavior of these fuels. Very powerful imaging equipment was used to record the spray images of the fuels and the data were extracted by analyzing the images. Finally, the method of maximum entropy was used for numerical analysis of the distribution function of fuels spray. From a pressure difference of 15 bar onwards, the mass flow rate of the fuel remains almost constant (between 1.6 and 1.8 g/s). The angle of the Mazut fuel spray cone initially increases, and after the flow approaches full atomization (at temperatures above 90 ° and pressures above 15 bar), it reaches approximately a constant value of 80° (the diesel spray cone angle also reaches an almost constant value of 85°). The breakup length and droplets diameter also decrease with increasing fuel temperature and pressure, and with the full development of the flow, they tend to almost zero. The diameter size distribution of droplets becomes smoother and more uniform by increasing the viscosity of the fluid. Also, the velocity distribution of droplets becomes smoother and more uniform by decreasing the viscosity of the fluid.

Keywords: Experimental testing, Atomization, Numerical solution, Maximum entropy