



Experimental Study of Spray Characteristics of Pressure-Swirl Atomizers and Determination of Droplet Size Distribution Function

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Shafae Roshania M.^{1*},
Ounia A.¹,

How to cite this article

Shafae Roshania M, Ounia A. Experimental Study of Spray Characteristics of Pressure-Swirl Atomizers and Determination of Droplet Size Distribution Function. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(01):11-21.

¹ College of Interdisciplinary Sciences and Technologies, University of Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: College of Interdisciplinary Sciences and Technologies, University of Tehran, Iran.

mshafae@ut.ac.ir

Article History

Received: November 23, 2024

Accepted: January 21, 2025

ePublished: February 27, 2025

ABSTRACT

The performance of combustion systems is significantly influenced by the quality of the fuel injection. Swirl atomizers are commonly used in combustion engines due to their simplicity, cost-effectiveness, and reliability. Despite numerous experimental studies on pressure-swirl atomizer spray, a comprehensive mathematical model for predicting spray characteristics has not yet been presented. Additionally, there is no consensus on the distribution function accurately describing droplet size dispersion. In the present study, the main characteristics of pressure-swirl atomizer spray, including discharge coefficient, spray cone angle and droplet size distribution, were experimentally investigated using the shadowgraph technique. The study spanned a wide range of Reynolds numbers, from 1250 to 8500, encompassing laminar, transition, and atomization regimes. The findings showed that the discharge coefficient initially declined during the transition stage, followed by a gradual increase up to the atomization regime. In the atomization regime, the discharge coefficient remained almost constant. A similar trend was observed for the spray cone angle throughout the transient and atomization phases. The gamma distribution function provided a favourable fit with the experimental drop size distribution in the near-ligament location, where primary breakup mechanisms dominate. The log-normal distribution function showed superior fitting with the experimental droplet size distribution for regions distant from the liquid sheet disintegration point, where secondary breakup mechanisms exert a more pronounced influence on droplet dispersion. Overall, these findings provide valuable insights into spray characteristics and associated uncertainties.

Keywords Spray Characteristics, Pressure-Swirl Atomizer, Droplet Size Distribution, Shadowgraph Technique.

CITATION LINKS

1- Schlieren and mie-scattering visualization of 2- Advances in plasma-assisted ignition and combustion for 3- Advances in plasma-assisted ignition and 4- Investigating the role of atomization on 5- Investigations of the effects of spray characteristics on 6- Experimental investigation on swirling spray forced ignition of 7- Review on pressure swirl injector in 8- Sheet-breakup characteristics of 9- Visualization of internal flow and the effect of orifice geometry on the characteristics of spray and 10- Distribution function and atomization parameters of 11- Atomization and sprays. 12- Experimental investigation on fluid structure and 13- Spray measurement technology: a review. 14- Size and velocity characteristics of 15- Dynamical similarity and universality of drop size and 16- Experimental investigations of spray generated by 17- Evaluation of the atomization characteristics of 18- Air-liquid interactions in a ... 19- Experimental characterization of a 20- Experimental studies on fuel spray characteristics of pressure-swirl atomizer and 21- Experimental investigations of spray characteristics of 22- Experimental comparison of the spray atomization of 23- Reverse analysis of a spiral injector to find geometrical parameters and 24- Influence of orifice geometry on atomization characteristics of 25- A study of spray performance of MEMS-based 26- Development and application of a preliminary design methodology for 27- Assessment of measurement efficiency in 28- On the statistical characterization of 29- Internal flow and air core dynamics in 30- Measuring air core characteristics of a pressure-swirl atomizer via a 31- Planar Sauter mean diameter measurements in liquid centered swirl coaxial injector using 32- Why drop size distributions in 33- Ligament-mediated spray formation. 34- Physics of liquid jets. 35- What determines the drop size in sprays?.

مطالعه تجربی مشخصه‌های اسپری اتمایزر فشاری-پیچشی و تعیین تابع توزیع اندازه قطرات

مازیار شفایی روشنی^{۱*}، عباس عونی^۱

^۱ گروه آبروپیش‌رانش، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

کیفیت پاشش اسپری در عملکرد سیستم‌های احتراقی تأثیر قابل توجهی دارد. اتمایزرهای فشاری-پیچشی به علت سادگی و ارزانی و عملکرد مناسب آنها، بطور گسترده در موتورهای احتراقی مورد استفاده قرار می‌گیرند. علی‌رغم مطالعات تجربی بسیار در حوزه اسپری اتمایزرهای فشاری-پیچشی، به دلیل عدم شناخت کامل مکانیزم‌های پاشش، هنوز مدل ریاضی جامعی برای پیش‌بینی مشخصه‌های اتمایزر ارائه نگردیده و در خصوص تابع توزیع توصیف کننده پراکندگی اندازه قطرات، اتفاق نظر وجود ندارد. در مطالعه حاضر، مشخصه‌های اصلی اسپری اتمایزرهای فشاری-پیچشی شامل ضریب تخلیه، زاویه مخروط پاشش و توزیع اندازه قطرات، با استفاده از تکنیک سایه‌نگاری مورد بررسی تجربی قرار گرفت. این مطالعه در طیف گسترده‌ای از اعداد رینولدز از ۱۲۵۰ تا ۸۵۰۰ در رژیم‌های آرام، گذار و اتمیزاسیون، انجام شد. یافته‌ها نشان داد که با افزایش عدد رینولدز، ضریب تخلیه پس از یک کاهش ناگهانی در شروع مرحله گذار، مجدداً افزایش یافته و در رژیم اتمیزاسیون تقریباً ثابت می‌ماند. روند مشابهی برای زاویه مخروط اسپری در سراسر رژیم‌های گذار و اتمیزاسیون مشاهده شد. تابع توزیع گاما انطباق مطلوبی را با توزیع اندازه قطرات آزمایشی، در محل نزدیک به رباط ها، در جایی که مکانیسم‌های شکست اولیه غالب هستند؛ نشان داد. تابع توزیع لاگ-نرمال برازش خوبی با توزیع اندازه قطرات تجربی برای نواحی دور از شکست اولیه ورقه مایع، درجایی که مکانیسم‌های شکست ثانویه تأثیر بیشتری بر پراکندگی قطرات دارند؛ نشان داد. یافته‌های این مطالعه، بینش ارزشمندی را در مورد مشخصه‌های اسپری اتمایزر فشاری-پیچشی و عدم قطعیت‌های مرتبط با آن، ارائه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: مشخصه‌های اسپری، اتمایزر فشاری-پیچشی، توزیع اندازه قطرات، تکنیک سایه‌نگاری.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۲

* نویسنده مسئول: mshafaei@ut.ac.ir

۱- مقدمه

کیفیت اتمیزاسیون (Atomization) سوخت برای دستیابی به عملکرد احتراق بهینه بسیار مهم است^[1]. اندازه متوسط قطرات و توزیع اندازه قطرات پارامترهای کلیدی مورد استفاده برای ارزیابی این کیفیت هستند. قطرات کوچکتر به افزایش سطح تماس سوخت و هوا کمک کرده و راندمان احتراق را از طریق سرعت تبخیر و نرخ سوزش، بهبود می‌دهند^[2]. محفظه‌های احتراق با تولید ناکس اندک (Low NOx)، نیازمند تبخیر سریع سوخت و اختلاط کامل آن با هوا برای رسیدن به شکل‌گیری سریع مناطق غنی از

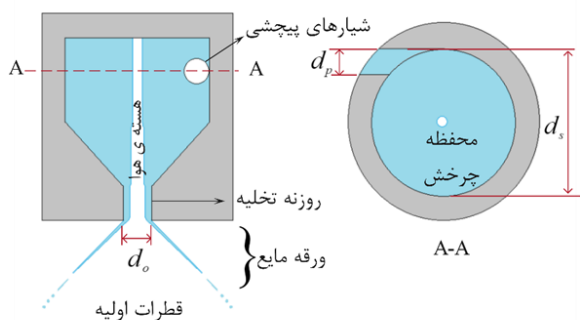
سوخت می‌باشند، که این امر مستلزم کاهش قطر متوسط قطرات اسپری سوخت است^[3].

از سویی دیگر، اسپری‌هایی با اندازه متوسط یکسان، اما توزیع‌های مختلف حول این اندازه متوسط، نرخ سوختن متفاوتی را نشان می‌دهند. توزیع‌هایی با یکنواختی کمتر به دلیل وجود گستره وسیع‌تری از اندازه‌های قطرات، احتراق پایدارتری ایجاد می‌کنند^[4,5]. از سویی دیگر فرآیند اشتعال وابسته به توزیع اندازه قطرات و زاویه مخروط اسپری است^[6].

اتمایزرهای فشاری-پیچشی (Pressure-swirl atomizers) به دلیل طراحی ساده، هزینه کم و قابلیت اطمینان بالا، کاربرد گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف صنعتی از جمله توربین‌های گاز، خنک‌کاری اسپری، پوشش‌دهی، کشاورزی و داروسازی دارند^[7]. این استفاده گسترده انگیزه پژوهش‌های گسترده‌ای برای شناسایی مکانیزم شکست اسپری و پیش‌بینی مشخصه‌های این نوع اتمایزرها گردیده است^[8].

دینامیک هسته‌ای هوا (Air core dynamics) در اتمایزرهای فشاری-پیچشی نقش اساسی در شکل‌گیری رژیم اتمیزاسیون و تعیین مشخصه‌های اسپری دارد. کویی (Cui) و همکارانش شکل‌گیری و توسعه هسته‌ای هوا را در تعدادی اتمایزرهای فشاری-پیچشی شفاف با قطر روزنه‌های مختلف، مورد مطالعه قرار دادند. تحقیقات آنها نشان داد که شکل‌گیری و توسعه هسته‌ای هوا، تأثیر قابل توجهی بر ضریب تخلیه و قطر متوسط قطرات دارد. علاوه بر این، آنها نشان دادند که با رسیدن فشار به یک حد بحرانی، هسته‌ای هوا بطور کامل در اتمایزر نفوذ کرده و افزایش فشار، دیگر تغییر قابل توجهی در مشخصه‌های اتمایزر ایجاد نمی‌کند^[9]. مطالعات بیشتر توسط رستمی و همکارانش در اتمایزرهای فشاری-پیچشی نشان داد که افزایش فشار تا حد فشار بحرانی، منجر به افزایش ضریب تخلیه می‌شود ولی با افزایش بیشتر فشار، تغییر قابل توجهی در ضریب تخلیه مشاهده نمی‌گردد^[10].

در یک اتمایزر فشاری-پیچشی، حجم پیوسته مایع بصورت یک مخروط توخالی (Hollow cone)، از روزنه اتمایزر خارج شده و سپس با ایجاد ناپایداری‌ها بر روی سطح ورقه، به رباط‌ها (Ligaments) و سپس قطرات اولیه شکسته می‌شود. قطرات تولید شده در فرایند شکست اولیه، مجدداً در طی شکست ثانویه در اثر ناپایداری‌های آیرودینامیکی، به قطرات کوچکتر تبدیل می‌شوند؛ به طوری که در اثر مکانیزم‌های شکست اولیه و ثانویه قطرات، طیفی از قطرات با اندازه‌های مختلف ایجاد می‌شوند. توزیع اندازه قطرات وابسته به خواص سیال و مشخصه‌های اتمایزر می‌باشد^[11]. کیفیت اسپری معمولاً با اندازه متوسط قطرات، مانند قطر متوسط ساتر (Sauter mean diameter, SMD) ارزیابی می‌شود؛ در حالی که توزیع در اطراف این مقدار متوسط نیز در کاربردهای مختلف، می‌تواند حائز اهمیت باشد.



شکل ۱) شماتیک اسپری، هسته‌ی هوا و ابعاد اصلی اتمایزر فشاری-پیچشی

قطرات، اتفاق نظر وجود ندارد. هدف این مقاله بررسی مشخصه‌های اسپری اتمایزرهای فشاری-پیچشی، از جمله ضریب تخلیه، زاویه مخروط اسپری و اندازه متوسط و توزیع اندازه قطرات است. در مطالعه حاضر، آزمایش‌های گسترده‌ای بر روی اتمایزر پیچشی-چرخشی در طیف وسیعی از اعداد رینولدز برای بررسی تغییرات در مشخصه‌های اسپری در رژیم‌های مختلف جریان، انجام شد. نتایج نشان داد که تغییر در رژیم جریان و مشخصه‌های اسپری، مرتبط با شکل‌گیری و نفوذ هسته‌ی هوا می‌باشد. توزیع اندازه قطرات به دقت در موقعیت‌های شعاعی و محوری مختلف در مخروط اسپری ارزیابی شد و تناسب توابع توزیع گاما و لاگ-نرمال (Log-normal) برای برازش داده‌های تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- چیدمان تجربی

۲-۱- اتمایزرهای مورد مطالعه

در تحقیق حاضر، دو اتمایزر فشاری-پیچشی با قطر روزنه‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. در این اتمایزرها جریان سیال از طریق چهار شیار مماسی وارد محفظه چرخش شده و باعث کاهش محلی فشار در داخل محفظه چرخش و در نتیجه آن، نفوذ تدریجی هسته‌ی هوا از روزنه خروجی به پشت محفظه چرخش می‌گردد. سیال بصورت ورقه‌ی نازک از روزنه خارج و تشکیل یک مخروط توخالی را می‌دهد. ناپایداری‌های سطح مایع منجر به شکست ورقه به رباط و شکست رباط‌ها به قطرات اولیه می‌گردد. همانطور که قطرات به سمت پایین دست روزنه حرکت می‌کنند، تحت تأثیر هوای اطراف به قطرات کوچکتر تجزیه می‌شوند. مشخصه‌های اسپری تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله هندسه اتمایزر، خواص مایع و هوای پیرامونی و شرایط کاری اتمایزر، از جمله افت فشار است. ثابت هندسی اتمایزر، که بیانگر توصیف هندسی بدون بعد از مهم‌ترین پارامترهای هندسی موثر بر مشخصه‌های اسپری است، با معادله (۱) تعریف می‌شود.

$$K = \frac{A_p}{d_o d_s} \quad (1)$$

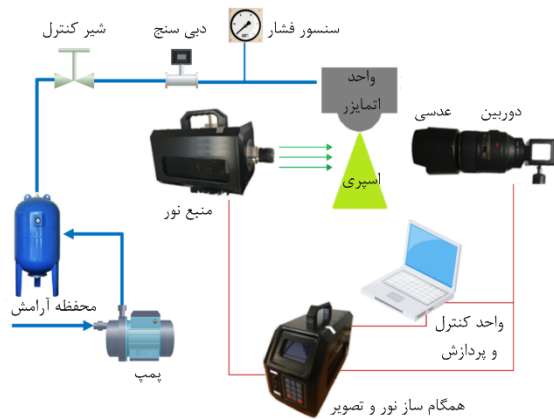
توزیع اندازه و سرعت قطرات در اتمایزرهای فشاری-پیچشی در پژوهش‌های انجام شده برای تعیین مشخصه‌های این نوع اتمایزرها، مورد مطالعه قرار گرفته است [12]. از آنجایی که مدل‌های شکست قطرات هنوز به طور کامل توسعه نیافته‌اند، معمولاً روش‌های تصویری برای اندازه‌گیری توزیع اندازه و سرعت قطرات، مورد استفاده قرار می‌گیرد [13]. وانکسوارام و دیواندرن (Vankeswaram and Deivandren) دریافتند که تابع توزیع گاما بهترین برازش را برای توزیع تجربی اندازه قطرات در ناحیه نزدیک به نازل، نشان می‌دهد [14]. دیوپیراجا (Ligaments) با استفاده از متغیر موقعیت شعاعی بدون بعد، شباهت بین توزیع اندازه بی بعد قطرات در فواصل طولی مختلف را نشان داد [15].

لیو (Liu) و همکارانش با اندازه‌گیری اندازه قطرات در فواصل محوری مختلف، پدیده ادغام قطرات در پایین دست اسپری را نشان دادند [16]. دفسری (Dafarsi) و همکارانش نشان دادند که افزایش فشار منجر به کاهش متوسط اندازه قطرات می‌شود [17]. جدلسکی (Jedelski) و همکارانش مشاهده کردند که نوسانات در جریان داخلی اتمایزر، عمدتاً مشخصه‌های اسپری را تا فاصله ۱۰ میلی‌متری از روزنه خروجی نازل کنترل می‌کند؛ در حالی که برهم‌کنش گاز-مایع بر مشخصه‌های اسپری در فواصل دورتر اثرگذار است. علاوه بر این، آنها افزایش در اندازه متوسط قطرات در فواصل دورتر از خروجی نازل را گزارش کردند [18].

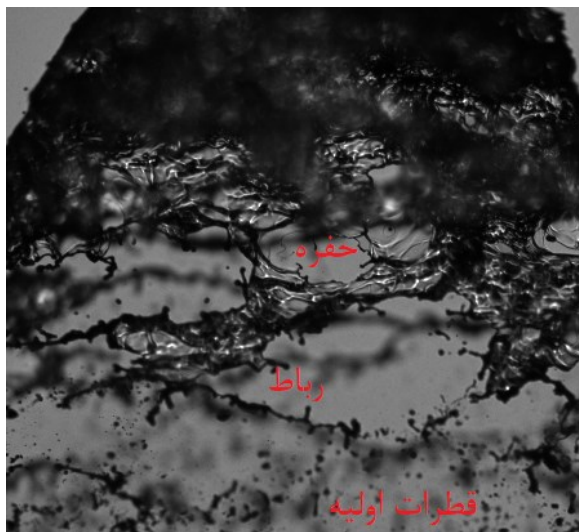
شکل بیرونی اسپری اتمایزرهای فشاری-پیچشی، با تمرکز ویژه بر زاویه مخروط اسپری و طول شکست، موضوع مطالعات تجربی بوده است [19]. این مطالعات نشان دهنده تأثیر قابل توجه فشار اتمایزر بر این مشخصه‌های خارجی بوده است. نشان داده شده است که با رسیدن به فشار بحرانی، افزایش فشار بیشتر، تغییر قابل توجهی در زاویه پاشش ایجاد نمی‌کند [20]. علاوه بر این، لیو و همکارانش نشان دادند که با افزایش فاصله از دهانه خروجی، مخروط اسپری دچار انقباض می‌شود [16]. همچنین افزایش فشار در اتمایزر منجر به ایجاد ورقه نازک‌تر مخروط اسپری می‌شود که این امر منجر به کاهش طول شکست می‌شود. مطالعات تجربی بر روی اتمایزرهای فشاری-پیچشی، کاهش طول شکست با افزایش فشار و نیز افزایش عدد وبر را گزارش کرده اند [21,22].

تأثیر پارامترهای هندسی اتمایزر بر مشخصه‌های اتمایزر فشاری-پیچشی توسط نگارنده و محققان دیگر بررسی شده است [23,24]. بر پایه مطالعات تجربی کویی و همکارانش، افزایش قطر روزنه، تشکیل و نفوذ هسته‌ی هوا را تسریع می‌کند [9]. علاوه بر این، کوماران (Kumaran) و همکارانش نشان دادند که با افزایش قطر روزنه خروجی، زاویه پاشش کاهش می‌یابد [25].

پیش‌بینی دقیق مشخصه‌های اسپری یک اتمایزر برای بهینه‌سازی عملکرد اتمایزر ضروری است [26]. اگر چه کارهای تحقیقاتی متعددی در حوزه اتمایزاسیون اسپری انجام شده است، هنوز در مورد مناسب‌ترین تابع توزیع توصیف‌کننده توزیع تجربی اندازه



شکل ۲) شماتیک سیستم آزمون



شکل ۳) تصویر سایه‌نگار مخروط اسپری اتمایزر شماره ۱ در فشار ۲/۵۰ مگاپاسکال (محل سوراخ شدن ورقه مایع، رابط‌ها و قطرات اولیه، بر روی شکل نشان داده شده است)

مخروط اسپری و همچنین اندازه و سرعت قطرات استفاده شده است. نمایش شماتیک از مجموعه آزمون در شکل ۲ ارائه شده است. شکل ۳ مخروط اسپری اتمایزر شماره ۱ را در فشار ۲/۵۰ مگاپاسکال، نشان می‌دهد. محل سوراخ شدن ورقه مایع، رابط‌های جدا شده و قطرات اولیه بر روی شکل نشان داده شده‌اند.

آزمایش‌ها در فشار محیط (چگالی هوا $1/041$ کیلوگرم بر مترمکعب) انجام شد و دمای آب در 15 درجه سلسیوس تثبیت گردید. خواص فیزیکی آب در این دما استخراج گردیده است (چگالی $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$ ، لزجت $\mu = 0/0091 \text{ N/ms}$ و کشش سطحی $\sigma = 0/072 \text{ N/m}$).

جدول ۱ شرایط آزمون برای اتمایزرهای شماره ۱ و شماره ۲، شامل اختلاف فشار، عدد رینولدز و عدد وبر را نشان می‌دهد.

در این معادله A_p نشان‌دهنده مساحت سطح مقطع شیارهای پیچشی، d_o نشان دهنده قطر روزنه تخلیه، و d_s نشان‌دهنده قطر محفظه چرخش است. شماتیک اسپری و هسته‌ی هوا و ابعاد هندسی اصلی اتمایزر فشاری-پیچشی در شکل ۱ ارائه شده است. اتمایزرهای مورد مطالعه دارای ثابت هندسی یکسان و قطر روزنه متفاوت می‌باشند؛ که این امر مطالعه اثر مستقل قطر روزنه بر مشخصه‌ها را ممکن می‌سازد. قطر روزنه اتمایزرهای شماره ۱ و ۲ به ترتیب 800 و 1000 میکرومتر و ثابت هندسی آنها برابر با $0/50$ می‌باشد. همچنین مساحت شیارهای چرخشی اتمایزرهای مورد مطالعه به ترتیب برابر با $1/02$ و $2/25$ میلیمتر مربع و قطر محفظه چرخش به ترتیب برابر با 3800 و 4500 میکرومتر می‌باشد. سایر ابعاد هندسی مانند طول روزنه و زاویه همگرایی محفظه چرخش در هر دو اتمایزر، یکسان است.

۲-۲- تجهیزات و شرایط آزمون

تجهیزات آزمون شامل سیستم تامین جریان سیال، واحد اتمایزر (Atomizer unit) و سیستم اندازه‌گیری می‌باشد. سیال واسطه، آب می‌باشد که توسط یک پمپ گریز از مرکز به واحد اتمایزر، منتقل می‌گردد. از یک محفظه آرامش (Accumulator) برای جذب نوسانات جریان سیال، استفاده شده است. سیستم اندازه‌گیری شامل سنسورهای فشار و سیستم سایه‌نگار (Shadowgraph)، برای اندازه‌گیری الگوی اسپری و توزیع اندازه قطرات است. به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری، از روش جرم سنجی برای اندازه‌گیری دبی جریان جریان اطمینان، اندازه‌گیری دبی با روش جرم سنجی تا 10 بار تکرار گردید. از سنسورهای فشار با محدوده‌های مختلف برای اندازه‌گیری فشارهای بالا و پایین استفاده شده است. سیستم سایه‌نگار Arsin-PhotoFreezer v2.70، شامل دوربین، عدسی تمرکز، منبع نور تک موج و همگام‌ساز نور و تصویر می‌باشد. در این سیستم از یک دوربین تجاری DSLR (۱۲ بیت، $5/5$ مگاپیکسل) با عدسی 105 میلی‌متری برای تمرکز بر روی فریم 8×8 میلی‌متر استفاده شده است. بیشینه جریان پالسی منبع نور 170 آمپر می‌باشد. پهنای پالس‌های منبع نور حداقل 125 نانوثانیه و حداکثر 100 میکروثانیه با گام 125 نانوثانیه‌ای می‌باشند. در آزمون‌های انجام شده، برای اندازه‌گیری اندازه قطرات، پهنای باند منبع نور بر روی 500 نانوثانیه تنظیم شد. با استفاده از دستگاه همگام‌ساز، فاصله زوج پالس‌های پیاپی، حداقل 1 میکروثانیه و حداکثر 1000 میکروثانیه با گام 1 میکروثانیه‌ای و فرکانس کاری در بازه 10 هرتز تا 1 کیلوهرتز قابل تنظیم می‌باشد. در آزمون‌های انجام شده فاصله زوج پالس‌ها بر روی 20 میکروثانیه تنظیم شد. واحد اتمایزر قادر به حرکت در سه جهت اصلی با دقت 1 میلی‌متر است که امکان تصویربرداری دقیق، از کل مخروط اسپری را فراهم می‌کند. از یک الگوریتم پردازش تصویر ویژه برای تعیین زاویه

جدول ۱) شرایط آزمون اتمایزهای شماره ۱ و شماره ۲ و پارامترهای بی بعد جریان در شرایط مختلف عملکرد اتمایزر.

فشار (مگاپاسکال)	اتمایزر شماره ۱				اتمایزر شماره ۲			
	دبی جرمی (گرم بر ثانیه)	عدد رینولدز جریان	عدد وبر جریان	ضخامت بی بعد ورقه مایع	دبی جرمی (گرم بر ثانیه)	عدد رینولدز جریان	عدد وبر جریان	ضخامت بی بعد ورقه مایع
۰/۱۰	۲/۵۲	۱۲۵۷	۲/۳	۰/۳۹۲	۴/۰۱	۱۵۵۲	۲/۹	۰/۳۷۳
۰/۲۰	۳/۵۹	۱۷۷۷	۴/۷	۰/۳۶۰	۵/۵۹	۲۱۹۵	۵/۸	۰/۳۴۱
۰/۳۰	۴/۳۷	۲۱۷۷	۷/۰	۰/۳۴۲	۷/۱۰	۲۶۸۸	۸/۷	۰/۳۲۷
۰/۳۵	-	-	-	-	۷/۷۰	۲۹۰۳	۱۰/۱	۰/۳۲۱
۰/۴۰	۵/۱۵	۲۵۱۴	۹/۴	۰/۳۳۱	۸/۳۶	۳۱۰۳	۱۱/۶	۰/۳۱۸
۰/۵۰	۵/۸۵	۲۸۱۱	۱۱/۷	۰/۳۲۳	۹/۳۲	۳۴۷۰	۱۴/۵	۰/۳۰۸
۰/۵۵	۶/۰۸	۲۹۴۸	۱۲/۹	۰/۳۱۹	-	-	-	-
۰/۶۰	۶/۳۲	۳۰۷۹	۱۴/۱	۰/۳۱۵	۱۰/۱۹	۳۸۰۱	۱۷/۱	۰/۳۰۱
۰/۷۰	۶/۹۳	۳۳۲۶	۱۶/۴	۰/۳۱۰	۱۰/۹۵	۴۱۰۶	۲۰/۳	۰/۲۹۵
۰/۸۰	۷/۴۶	۳۵۵۵	۱۸/۸	۰/۳۰۵	۱۱/۷۷	۴۳۸۵	۲۳/۲	۰/۲۹۱
۰/۹۰	۷/۹۰	۳۷۷۱	۲۱/۲	۰/۳۰۱	۱۲/۵۰	۴۶۵۵	۲۶/۱	۰/۲۸۶
۱/۰۰	۸/۳۵	۳۹۷۵	۲۳/۵	۰/۲۹۷	۱۳/۲۴	۴۹۰۷	۲۹/۰	۰/۲۸۳
۱/۳۰	-	-	-	-	۱۵/۰۶	۵۵۹۵	۳۷/۷	۰/۲۷۴
۱/۵۰	۱۰/۲۴	۴۸۶۸	۳۵/۲	۰/۲۸۳	۱۶/۱۴	۶۰۱۰	۴۳/۵	۰/۲۶۹
۲/۰۰	۱۱/۷۹	۵۶۲۱	۴۷/۰	۰/۲۷۳	۱۸/۶۸	۶۹۴۰	۵۸/۰	۰/۲۵۹
۲/۵۰	۱۳/۱۷	۶۲۸۵	۵۸/۷	۰/۲۶۵	۲۰/۷۸	۷۷۵۹	۷۲/۵	۰/۲۵۲
۳/۰۰	۱۴/۴۵	۶۸۸۴	۷۰/۴	۰/۲۵۹	۲۲/۷۱	۸۴۹۹	۸۷/۰	۰/۲۴۶
۳/۵۰	۱۵/۵۸	۷۴۳۶	۸۲/۲	۰/۲۵۴	-	-	-	-
۴/۰۰	۱۶/۷۰	۷۹۵۰	۹۳/۹	۰/۲۵۰	-	-	-	-

آزمون اسپری برپایه آنتروپی شانون، روشی مبتنی بر نظریه اطلاعات را برای ارزیابی یکنواختی اسپری معرفی کرده است [27]. شانون اطلاعات را به عنوان معیاری برای عدم قطعیت تعریف کرد و آنتروپی را به عنوان میانگین اطلاعات به دست آمده از همه داده‌ها معرفی نموده و آن را به احتمال مشاهده هر نمونه در یک آزمایش مرتبط نمود. رابطه بین آنتروپی (H)، اندازه نمونه (n) و احتمال (p) را می‌توان به صورت معادله (۳) بیان کرد.

$$H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{1}{p_i}\right) \quad (3)$$

معمولا آنتروپی بر اساس حداکثر مقدار آنتروپی بصورت معادله (۴) نرمال می‌شود.

$$H_n = \frac{H}{\ln(n)} \quad (4)$$

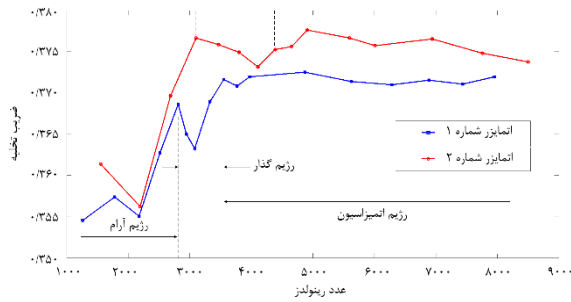
آنتروپی بهینه زمانی حاصل می‌شود که افزودن یک نمونه بیشتر، منجر به تغییرات قابل توجه در آنتروپی نشود. برای تعیین اندازه نمونه‌ی بهینه، انتخاب یک معیار همگرایی مناسب، حائز اهمیت است. در مطالعه حاضر از مفهوم آنتروپی اضافی (Excess entropy) که توسط فلدمن (Feldman) معرفی و توسط پانائو برای تعیین همگرایی آنتروپی در آزمون‌های اسپری مورد استفاده قرار گرفت، استفاده شده است [28].

عدد رینولدز با استفاده از رابطه $Re = \rho_l d_o u / \mu$ و عدد وبر با رابطه $We = \rho_a d_o u^2 / \sigma$ محاسبه شده است. u نشان دهنده سرعت ایده آل می‌باشد که براساس رابطه برنولی محاسبه شده است ($u = \sqrt{2\Delta P / \rho_l}$). زیرنویس l مربوط به سیال واسطه و زیرنویس a مشخص‌کننده هوای پیرامونی است. برای تعیین ضخامت ورق مایع از معادله نیمه تجربی (۲) پیشنهاد شده توسط سویاری و لوفور (Suyari and Lefebvre) استفاده شده است [11]. ضخامت ورق مایع براساس قطر روزنه خروجی بعد گردیده است.

$$t_f = 2.54 \left[\frac{d_o^2 \mu_l^2 Re}{\Delta P \rho_l} \right]^{0.25} \quad (2)$$

۲-۳- تعیین تعداد نمونه‌های آزمون

حجم بسیار بالای داده‌های قابل تولید توسط روش‌های تصویری، پردازش داده‌ها را به یک چالش اساسی تبدیل می‌کند. تعداد نمونه‌ها باید در حدی باشد که ضمن تامین قابلیت اطمینان نتایج آزمون، از افزایش بی مورد هزینه آزمون جلوگیری نماید. لذا بهینه‌سازی تعداد نمونه‌ها ضروری است. پانائو (Panao) تحقیقات گسترده‌ای در حوزه عدم قطعیت‌های تصادفی در آزمون‌های اسپری، انجام داده است. او همبستگی تجربی بین دقت توزیع احتمال تجمعی گسسته و آنتروپی شانون (Shannon entropy) را پیشنهاد نموده است. پانائو ضمن بهینه‌سازی تعداد نمونه‌های



شکل ۵) اثر عدد رینولدز بر ضریب تخلیه برای اتمیزر شماره ۱ با قطر روزنه ۸۰۰ میکرومتر و اتمیزر شماره ۲ با قطر روزنه ۱۰۰۰ میکرومتر

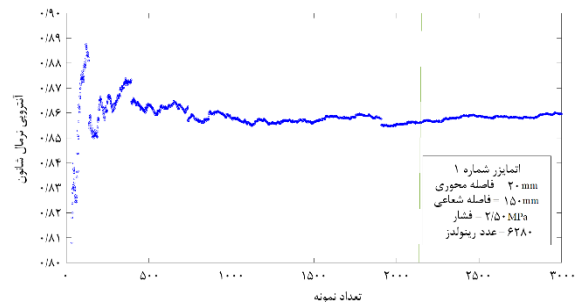
شده و به تبع آن، یک اسپری پایدار ایجاد می‌شود^[29]. در طی رژیم آرام، افت ناشی از لزجت با $\sqrt{Re}$ کاهش و متناسب با آن ضریب تخلیه افزایش می‌یابد. در مرحله گذار ضریب تخلیه با ورود هسته‌ی هوا به روزنه، بطور ناگهانی کاهش و به دنبال آن مجدداً افزایش می‌یابد. در رژیم اتمیزاسیون به دلیل پایدار شدن هسته‌ی هوا، ضریب تخلیه تقریباً مستقل از عدد رینولدز می‌باشد.

بر اساس نتایج آزمون، عدد رینولدز مرحله گذار برای اتمیزر شماره ۱ بین ۲۸۰۰ تا ۳۵۵۰ (با افت فشار از ۰/۵۰ الی ۰/۷۰ مگاپاسکال) است، در حالی که برای اتمیزر شماره ۲ از ۳۱۰۰ تا ۴۴۰۰ (با محدوده افت فشار ۰/۴۰ تا ۰/۸۰ مگاپاسکال) می‌باشد. این یافته‌ها به محدوده‌ی گذار که توسط لی (Lee) گزارش شده ($Re < 3450$) نزدیک است^[30]. مشاهده می‌شود که در اتمیزرهایی با قطر دهانه بزرگتر، آستانه فشار پایین‌تری وجود دارد که در آن هسته‌ی هوا تشکیل می‌شود و در عین حال اسپری در افت فشار بالاتری پایدار می‌گردد، که این مشاهده منطبق بر یافته‌های موجود در پژوهش‌های تجربی است^[9].

۳-۲- زاویه مخروط اسپری

زاویه مخروط اسپری نقش مهمی در توزیع قطرات اسپری دارد و در کاربردهای مختلفی مانند سیستم‌های احتراقی، پوشش‌دهی و خنک‌کاری اهمیت زیادی دارد. زاویه مخروط اسپری بر پارامترهای عملکردی موتورهای توربین گاز از جمله اشتعال، فاکتور شکل دما (Pattern factor) و نیز میزان دوده‌گذاری، موثر است^[21].

در مطالعه حاضر، زاویه مخروط اسپری با استفاده از روش سایه‌نگاری اندازه‌گیری شد. به منظور افزایش دقت، در هر فشار اسپری برای اندازه‌گیری زاویه، حداقل از ۱۵۰ فریم تصویربرداری استفاده شده است. در شکل ۶ اثر عدد رینولدز بر زاویه مخروط اسپری در فاصله ۸ میلی‌متری از روزنه تخلیه، نشان داده شده است. در طی مرحله گذار زاویه مخروط اسپری با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. در رژیم اتمیزاسیون زاویه مخروط اسپری با افزایش عدد رینولدز کاهش اندکی نشان می‌دهد که این یافته مطابق نتایج مطالعات قبلی است^[16]. چنانچه مشاهده می‌شود؛ اتمیزر شماره ۲، با قطر روزنه بزرگتر، زاویه مخروط بیشتری نسبت



شکل ۴) تغییرات آنتروپی نرمال شده با افزایش تعداد نمونه‌های قطرات اسپری در یک فریم اندازه‌گیری نمونه

در آزمون‌های انجام شده در طی این تحقیق، براساس تعداد نمونه بهینه حاصل از روش آنتروپی شانون، تعداد تصویرهای اخذ شده برای هر فریم، تنظیم شد. برای نمونه، نمودار شکل ۴، تغییرات آنتروپی نرمال با افزایش تعداد نمونه‌ها را برای یک فریم اندازه‌گیری نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود؛ در ابتدا با افزایش تعداد نمونه‌ها، آنتروپی افزایش قابل توجهی می‌یابد، اما در نهایت با افزایش بیشتر تعداد نمونه‌ها، آنتروپی به یک حالت پایدار می‌رسد. بر اساس نتایج حاصل شده، تعداد نمونه بهینه برای این فریم تقریباً ۲۱۵۰ بود که با گرفتن ۲۲ تصویر از این فریم، به دست آمد. لازم به ذکر است که پرش‌های مشاهده شده در نمودار با مشاهده قطراتی با اندازه غیرعادی، مرتبط است. این ناهنجاری‌ها می‌تواند ناشی از مکانیزم‌های جانبی اتمیزاسیون، مانند ادغام و یا ناشی از خطای اندازه‌گیری باشد.

۳- نتایج

۳-۱- ضریب تخلیه

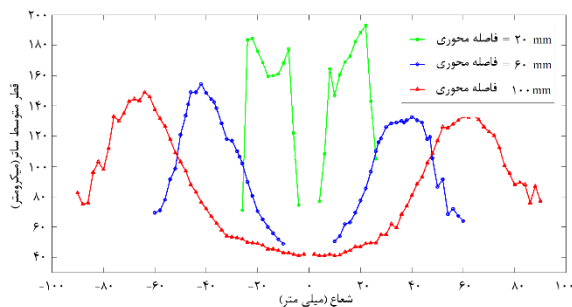
ضریب تخلیه معیاری برای مقایسه دبی واقعی با حداکثر دبی تئوری می‌باشد. ضریب تخلیه با ترکیب معادلات پیوستگی و برنولی به صورت معادله (۵) حاصل می‌شود.

$$C_d = \frac{\dot{m}}{A_o \sqrt{2\rho_l \Delta P}} \quad (5)$$

در معادله فوق $\dot{m}$ دبی جریان، A_o نشان‌دهنده مساحت خروجی، ρ_l نشان دهنده چگالی سیال و ΔP اختلاف فشار بین ورودی شیارهای چرخشی و فشار محیط، یا به اختصار فشار اتمیزر، است.

در اتمیزرهای فشاری-پیچشی، ضریب تخلیه به دلیل وجود هسته‌ی هوا به طور قابل توجهی پایین است. شکل ۵ تغییرات ضریب تخلیه با افزایش عدد رینولدز را نشان می‌دهد.

با افزایش فشار، اسپری اتمیزرهای فشاری-پیچشی سه رژیم متفاوت را تجربه می‌کنند. رژیم جریان آرام، که در آن هنوز هسته‌ی هوا تشکیل نگردیده است. پس از آن یک مرحله گذار وجود دارد که در آن هسته‌ی هوا از روزنه خروجی شروع و به سمت محفظه چرخش توسعه می‌یابد. هسته‌ی هوا در رژیم اتمیزاسیون، کامل



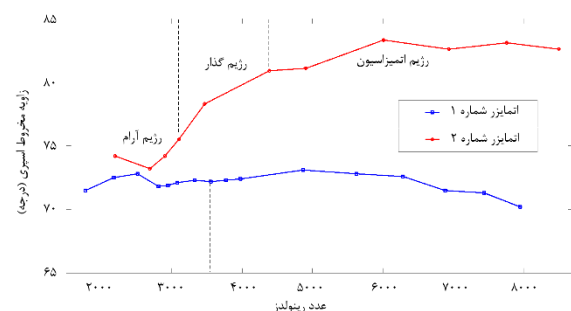
شکل ۷) توزیع قطر متوسط سائر در موقعیت های شعاعی و محوری برای اتمایزر شماره ۱ در عدد رینولدز ۵۶۲۰

را نشان می‌دهد. قطرات نزدیک‌تر به شعاع خارجی مخروط اسپری از متلاشی شدن رباط‌ها حاصل می‌شوند که این امر منجر به غلظت بر مبنای حجم و SMD بالاتر، در مقایسه با قطرات داخل مخروط اسپری می‌شود. به دلیل شکست ثانویه، کاهش SMD ، همراه با افزایش تعداد قطرات در جهت محوری مشاهده می‌گردد. شکل توخالی مخروط اسپری دلیل ایجاد قله‌های دوگانه در شکل ۷ است. اختلاف ارتفاع، ناشی از توزیع غیر یکنواخت اسپری می‌باشد.

۳-۴- توزیع پارامتریک اندازه قطرات

در تحقیقات اسپری، توزیع تجربی اندازه قطرات را می‌توان با استفاده از یک تابع توزیع پارامتری با دو پارامتر شکل و مقیاس، به صورت ریاضی بیان نمود. از این تابع ریاضی بر شبیه‌سازی عملکرد اتمایزر در تحلیلهای عددی استفاده می‌شود. مکانیزم‌های اثر گذار بر پراکندگی اندازه قطرات، از جمله شکست ورقه مایع، دینامیک رباط، و مکانیزم‌های شکست قطرات ثانویه، تعیین کننده تابع توزیع، می‌باشد. به دلیل دانش محدود در حوزه مکانیزم‌های اتمیزاسیون، در خصوص مناسب‌ترین تابع توصیف‌کننده توزیع تجربی قطرات اسپری، اتفاق نظر وجود ندارد. سه رویکرد اصلی برای توصیف فرآیند شکست ورقه مایع و پراکندگی قطرات وجود دارد؛ که عبارتند از اصل حداکثر آنتروپی (Maximum entropy principles)، تئوری آبشارهای متوالی شکست قطرات (Sequential cascades of breakups) و تئوری شکست رباط‌های چین‌دار (Fragmentation of corrugated ligaments).

اساس رویکرد حداکثر آنتروپی بر ترمودینامیک آماری استوار بوده و در طی آن تجزیه تصادفی حجم مایع به قطرات پراکنده فقط در یک مرحله اتفاق می‌افتد. این رویکرد محتمل ترین حالت را از طریق به حداکثر رساندن آنتروپی شانون تعیین می‌کند. برپایه این رویکرد، تابع روزین-رملر (Rosin-Rammler) و تابع چند متغیره نوکیاما-تاناساوا (Nukiyama-Tanasawa) برای توزیع اندازه قطرات، منتسب گردیده است. از تابع توزیع روزین-رملر که شکل ویژه‌ای از تابع ویبول (Weibull) است؛ بطور معمول برای



شکل ۶) اثر عدد رینولدز بر زاویه مخروط اسپری برای اتمایزرهای شماره ۱ و ۲ در فاصله ۸ میلی‌متری از روزنه خروجی

به اتمایزر شماره ۱ دارد. با توجه به یکسان بودن ثابت هندسی اتمایزرهای شماره ۱ و شماره ۲، استدلال می‌گردد؛ که در اتمایزرهای فشاری-پیچشی با قطر روزنه بزرگتر، زاویه اسپری بیشتر خواهد بود؛ که این نتیجه در مطالعات قبلی نشان داده شده است [11].

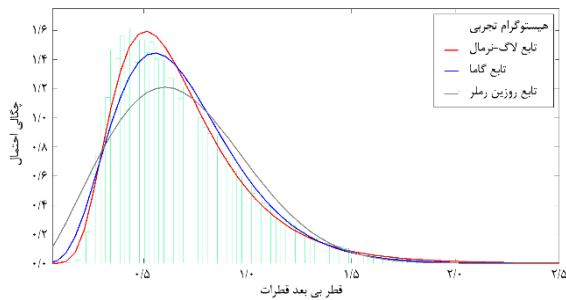
نسبت سرعت مماسی به سرعت محوری تعیین کننده زاویه مخروط اسپری می‌باشد. با دور شدن از روزنه خروجی اتمایزر، سرعت محوری به دلیل اثر نیروی گرانشی، افزایش می‌یابد. این امر منجر به انقباض مخروط اسپری، قبل از شکست ورقه مایع می‌گردد. لذا به منظور کاهش خطای اندازه‌گیری لازم است تا زاویه مخروط اسپری اتمایزرهای مختلف در فواصل محوری یکسان از روزنه خروجی اندازه‌گیری و مقایسه شود. تاثیر گرانش بر انقباض زاویه مخروط در فشارهای بالاتر، ناچیز است.

۳-۳- قطر متوسط قطرات

قطر متوسط قطرات را می‌توان با استفاده از معادله (۶) محاسبه کرد. زیرنویس i به تعداد کلاس‌های اندازه در توزیع تجربی اندازه قطرات اشاره دارد، در حالی که N نشان دهنده تعداد قطرات در هر کلاس اندازه، است. انتخاب پارامترهای a و b بستگی به کاربرد اتمایزر دارد. برای واکنش‌های شیمیایی، انتقال جرم و کاربردهای انتقال حرارت، معمولاً $a = 3$ و $b = 2$ انتخاب می‌شود که قطر متوسط حاصل به عنوان قطر متوسط سائر (SMD) شناخته می‌شود. SMD ، قطر قطره ایی است که نسبت حجم به سطح یکسانی با قطرات نمونه آزمون دارد.

$$D_{ab} = \left[\frac{\sum_{i=1}^I N_i D_i^a}{\sum_{i=1}^I N_i D_i^b} \right]^{\frac{1}{a-b}} \quad (6)$$

در صورتیکه فریم اندازه‌گیری به اندازه کافی کوچک باشد، هر فریم تقریباً یک نقطه منفرد در داخل اسپری را اندازه‌گیری می‌کند. با جابجایی فریم، می‌توان مشخصه‌های اسپری را در هر دو محور شعاعی و محوری اندازه‌گیری کرد. شکل ۷ مقدار SMD اندازه‌گیری شده در موقعیت های مختلف محوری و شعاعی مخروط اسپری



شکل ۸) توزیع پارامتریک اندازه قطرات برای اتمایزر شماره ۱ در عدد رینولدز ۵۶۲۰ بر پایه فرکانس تعداد

جدول ۲) اثر عدد رینولدز بر پارامتر شکل تابع گاما در فاصله ۲۰ میلیمتری از روزنه تخلیه برای اتمایزر شماره ۱

پارامتر شکل	عدد رینولدز	فشار (مگاپاسکال)
۴/۴۴۹	۲۸۱۱	۰/۵۰
۴/۶۶۱	۳۹۷۵	۱/۰۰
۴/۵۷۳	۴۸۶۸	۱/۵۰
۴/۶۲۷	۵۶۲۱	۲/۰۰
۴/۶۴۶	۶۲۸۵	۲/۵۰
۴/۷۷۱	۶۸۸۴	۳/۰۰
۴/۷۷۴	۷۴۳۶	۳/۵۰
۴/۸۱۹	۷۹۵۰	۴/۰۰

می‌کند. علاوه بر این، تعیین مرزهای قطرات کوچکتر می‌تواند عدم قطعیت بیشتری ایجاد کند. همچنین تبخیر سریع قطرات کوچکتر می‌تواند بر توزیع اندازه قطرات موثر باشد.

پارامتر شکل اسپری اتمایزرهای فشاری-پیچشی معمولاً بین ۴ تا ۵ است [35]. در رباط‌های چین‌دار، پارامتر شکل پایین‌تر به مفهوم توزیع غیر یکنواخت‌تر اندازه قطرات است. رباط‌های صاف‌تر پارامتر شکل بزرگتر و لذا توزیع قطرات یکنواخت‌تری دارند. جدول ۲ اثر عدد رینولدز بر پارامتر شکل تابع گاما را نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود؛ پارامتر شکل با افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد که این به معنی صاف‌تر بودن رباط‌ها و توزیع یکنواخت اسپری در رینولدز بالاتر است. اعداد رینولدز شکل‌گیری و تکمیل هسته‌ای هوا، به ترتیب ۲۸۱۰ و ۳۹۷۰ می‌باشد که در این محدوده ورقه مایع، نوسانات قابل توجهی داشته و پارامتر شکل به تبع آن رفتار نوسانی دارد.

شکل ۹ برازش توابع لاگ-نرمال و گاما را بر چارک‌های نمونه اسپری، در سه فاصله محوری مختلف را نشان می‌دهد. چنانچه در شکل ۹-الف) مشاهده می‌شود؛ تابع گاما مطابقت قابل قبولی را با پراکندگی تجربی در محل نزدیک به رباط‌ها، جایی که مکانیزم‌های شکست اولیه غالب هستند؛ نشان می‌دهد. چنانچه در شکل ۹-ب) و ۹-ج) مشاهده می‌شود؛ با افزایش فاصله محوری از روزنه تخلیه در نواحی که مکانیزم‌های شکست ثانویه بر

مدل‌سازی اتمایزرها در شبیه‌سازی‌های عددی، استفاده می‌شود [31]. تابع چگالی احتمال روزین-رملر (pd) برای اندازه قطرات (D) به عنوان متغیر تصادفی، با معادله (۸) بیان می‌شود. در این معادله، k پارامتر شکل و λ پارامتر مقیاس می‌باشد.

$$pd(k, \lambda, D) = \frac{k}{\lambda^k} D^{k-1} e^{-(D/\lambda)^k} \quad (8)$$

تئوری شکست آبشاری که بر پایه نظریه کولموگوروف (Kolmogorov) در مورد تجزیه ذرات جامد استوار است، شکست قطرات را به مثابه فرآیند متوالی و تصادفی ذرات بزرگتر به ذرات کوچکتر، توصیف می‌نماید. پانائو رشد نمایی در تنوع اندازه قطرات را به عنوان دلیل فیزیکی تناسب تابع لاگ-نرمال بر داده‌های تجربی اسپری مطرح نمود [32]. تابع چگالی احتمال لاگ-نرمال با معادله (۹) بیان می‌شود. در این معادله σ پارامتر شکل و μ نشان دهنده لگاریتم پارامتر مقیاس است.

$$pd(\sigma, \mu, D) = \frac{1}{D\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-1/2((\ln D - \mu)/\sigma)^2} \quad (9)$$

ویلرموس (Villermoux) و همکارانش تشکیل رباط‌ها و شکست آنها به قطرات اولیه را براساس ناپایداری‌های کلین-هلمهولتز (Kelvin-Helmholtz) و ریلی-تیلور (Rayleigh-Taylor) و همچنین ناپایداری‌های مویبرگی توضیح دادند [33]. در این تئوری توزیع قطرات با تجزیه و تحلیل زبری رباط‌های چین‌دار تعیین می‌شود، که این زبری می‌تواند منشاء مختلفی داشته باشد و پیش‌بینی آن دشوار است. در تحلیل انجام شده توسط ویلرموس، تابع توزیع گاما برای توزیع اندازه قطرات اسپری پیشنهاد شد [34]. تابع چگالی احتمال گاما با معادله (۱۰) نشان داده می‌شود، که در آن q پارامتر شکل و θ پارامتر مقیاس است.

$$pd(q, \theta, D) = \frac{1}{\Gamma(q)\theta^q} D^{q-1} e^{-D/\theta} \quad (10)$$

شکل ۸ برازش سه تابع توزیع روزین-رملر، لاگ-نرمال و گاما را بر روی هیستوگرام اندازه قطرات، برای اتمایزر شماره ۱ در عدد رینولدز ۵۶۲۰ نشان می‌دهد. محور افقی قطر بی بعد شده قطرات، براساس SMD را نشان می‌دهد. اندازه نمونه برای داده‌های شکل ۸ شامل $10^6 \times 2/41$ قطره است که در ۱۲۰ موقعیت مخروط اسپری اندازه‌گیری شده است. چنان که در شکل مشاهده می‌گردد تابع توزیع روزین-رملر از دقت کافی برای برازش توزیع تجربی اندازه قطرات برخوردار نیست. همچنین مشاهده می‌گردد که قطرات کوچک از الگوی پیش‌بینی شده انحراف قابل‌توجهی را نشان می‌دهند. این انحراف ممکن است به چالش‌های ذاتی در اندازه‌گیری قطرات کوچکتر به دلیل اثرات همپوشانی، به‌ویژه در ناحیه اسپری متراکم، مرتبط باشد. همچنین قطرات کوچکتر که دارای اینرسی کمتری هستند، تمایل به تجمع در داخل مخروط اسپری دارند که این امر نیز تشخیص آنها را چالش برانگیزتر

آرام مشخص می‌شود، جایی که هسته‌ی هوا هنوز به روزنه نفوذ نکرده و مشخصه‌های اسپری، مستقیماً تحت تأثیر عدد رینولدز قرار داد. مرحله دوم یا مرحله گذرا که با آغاز نفوذ هسته‌ی هوا به اتمایزر شروع می‌شود. در این مرحله مشخصه‌های اسپری وابسته به دینامیک هسته‌ی هوا است. مرحله سوم، رژیم اتمیزاسیون، که در این مرحله هسته‌ی هوا تثبیت شده و مشخصه‌های اسپری تقریباً ثابت است. یافته‌های اصلی این تحقیق برای اتمایزرهای فشاری-پیچشی توخالی مورد مطالعه، عبارتند از:

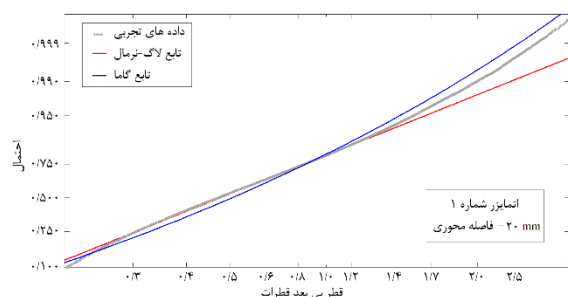
- در رژیم آرام، با افزایش عدد رینولدز، ضریب تخلیه افزایش می‌یابد. در شروع مرحله گذرا به علت انسداد ناگهانی ناشی از هسته‌ی هوا، ضریب تخلیه افت ناگهانی داشته و سپس مجدداً افزایش می‌یابد. در رژیم اتمیزاسیون، ضریب تخلیه تقریباً ثابت است. روند تغییرات زاویه مخروط اسپری در رژیم‌های گذرا و اتمیزاسیون، تقریباً مشابه الگوی ضریب تخلیه است.
- با افزایش قطر روزنه اتمایزر، هسته‌ی هوا در فشار پایین‌تری تشکیل شده و در فشار بالاتری، تکمیل می‌شود.
- در نواحی نزدیک به شکست ورقه مایع در جاییکه مکانیزم‌های اولیه شکست قطرات حاکم هستند؛ تابع توزیع گاما برازش قابل قبولی بر توزیع تجربی اندازه قطرات دارد. در نواحی دورتر، جاییکه مکانیزم‌های ثانویه شکست قطرات حاکم هستند؛ تابع توزیع لاگ-نرمال تناسب بهتری با پراکندگی قطرات دارد. تابع توزیع روزین-رملر، علیرغم کاربرد گسترده آن، انطباق مناسبی با توزیع تجربی قطرات نشان نمی‌دهد.
- در رژیم اتمیزاسیون، پارامتر شکل تابع گاما با افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده رباط‌های صاف‌تر در رینولدزهای بالاتر است.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

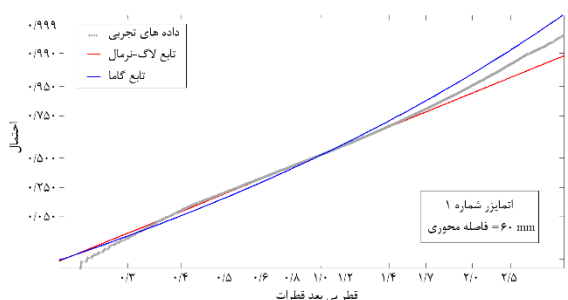
تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

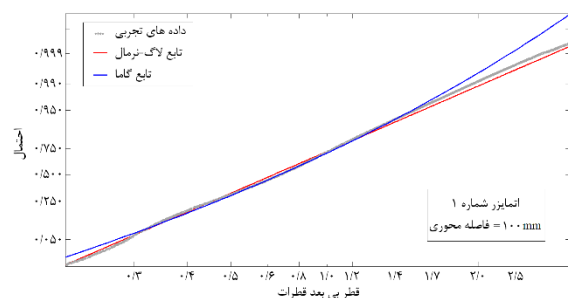
- 1- Liu R, Huang L, Ma Y, Ju D, Feng M, Lu X. Schlieren and mie-scattering visualization of an evaporating spray under marine diesel engine conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2023 Aug;237(5):1014-27.
- 2- Li M, Wang Z, Xu R, Zhang X, Chen Z, Wang Q. Advances in plasma-assisted ignition and combustion for combustors of aerospace engines. *Aerospace Science and Technology*. 2021 Oct 1;117:106952.
- 3- Li M, Wang Z, Xu R, Zhang X, Chen Z, Wang Q. Advances in plasma-assisted ignition and combustion



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹) مقایسه انطباق توابع توزیع لاگ-نرمال و گاما بر توزیع تجربی اندازه قطرات برای اتمایزر شماره ۱ در $Re = 5620$ در (الف) فاصله محوری ۲۰ میلیمتر، (ب) فاصله محوری ۶۰ میلیمتر و (ج) فاصله محوری ۱۰۰ میلیمتری از روزنه تخلیه

پراکندگی قطرات حاکم هستند؛ تابع توزیع لاگ-نرمال انطباق خوبی با داده‌های تجربی دارد. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود؛ دقت اندازه‌گیری قطرات کوچک با افزایش فاصله محوری بهبود می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

مشخصه‌های اسپری یک اتمایزر فشاری-پیچشی توخالی با استفاده از روش سایه‌نگاری مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق طیف وسیعی از اعداد رینولدز از ۱۲۵۰ تا ۷۹۵۰ (اختلاف فشار از ۰/۱۰ تا ۴/۰۰ مگاپاسکال) را در بر می‌گرفت. برای پرداختن به چالش ذاتی پردازش حجم انبوه داده‌ها در روش تصویربرداری، اندازه نمونه‌ها با استفاده از رویکرد آنتروپی شانون، بهینه‌سازی شد. پس از تحلیل مشخصه‌های تجربی اسپری تجربی، مشاهده گردید که در اتمایزرهای فشاری-پیچشی توخالی مورد مطالعه، توسعه اسپری در سه مرحله مجزا رخ می‌دهد. مرحله اول، با رژیم جریان

- 19- Amoresano A, Allouis CH, Di Santo M, Iodice P, Quaremba G, Niola V. Experimental characterization of a pressure swirl spray by analyzing the half cone angle fluctuation. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018 Jun 1;94:122-33.
- 20- Wang K, Fan X, Liu F, Liu C, Lu H, Xu G. Experimental studies on fuel spray characteristics of pressure-swirl atomizer and air-blast atomizer. *Journal of Thermal Science*. 2021 Mar;30:729-41.
- 21- Fan X, Liu C, Mu Y, Lu H, Yang J, Xu G. Experimental investigations of spray characteristics of a pressure-swirl atomizer. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2020 Aug;234(5):643-54.
- 22- Rostami E, Mahdavy Moghaddam H. Experimental comparison of the spray atomization of heavy and light fuel oil at different temperatures and pressures for pressure-swirl injector. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2021 Nov;235(7):1694-717.
- 23- Shafae M, Abdehkhakha A, Elkaie A. Reverse analysis of a spiral injector to find geometrical parameters and flow conditions using a GA-based program. *Aerospace Science and Technology*. 2014 Dec 1;39:137-44.
- 24- Zheng H, Liu Z, Wang K, Lin J, Li Z. Influence of orifice geometry on atomization characteristics of pressure swirl atomizer. *Science Progress*. 2020 Sep;103(3):0036850420950182.
- 25- Kumaran D, Tadigadapa S, Panchagnula MV. A study of spray performance of MEMS-based microscale pressure swirl atomizer. *Atomization and Sprays*. 2019;29(6).
- 26- Liu Y, Sun X, Sethi V, Li YG, Nalianda D, Abbott D, Gauthier P, Xiao B, Wang L. Development and application of a preliminary design methodology for modern low emissions aero combustors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2021 Jun;235(4):783-806.
- 27- Panão MR. Assessment of measurement efficiency in laser-and phase-Doppler techniques: an information theory approach. *Measurement Science and Technology*. 2012 Nov 15;23(12):125304.
- 28- Panão MO, Moita AS, Moreira AL. On the statistical characterization of sprays. *Applied Sciences*. 2020 Sep 3;10(17):6122.
- 29- Maly M, Jedelsky J, Slama J, Janackova L, Sapík M, Wigley G, Jicha M. Internal flow and air core dynamics in Simplex and Spill-return pressure-swirl atomizers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018 Aug 1;123:805-14.
- 30- Lee EJ, Oh SY, Kim HY, James SC, Yoon SS. Measuring air core characteristics of a pressure-swirl atomizer via a transparent acrylic nozzle at various Reynolds numbers. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010 Nov 1;34(8):1475-83.
- 31- Kannaiyan K, Banda MV, Vaidyanathan A. Planar Sauter mean diameter measurements in liquid centered swirl coaxial injector using laser induced fluorescence, Mie scattering and laser diffraction techniques. *Acta Astronautica*. 2016 Jun 1;123:257-70.
- for combustors of aerospace engines. *Aerospace Science and Technology*. 2021;117:106952.
- 4- Alsulami R, Windell B, Nates S, Wang W, Won SH, Windom B. Investigating the role of atomization on flame stability of liquid fuels in an annular spray burner. *Fuel*. 2020 Apr 1;265:116945.
- 5- Liu C, Liu F, Yang J, Mu Y, Xu G. Investigations of the effects of spray characteristics on the flame pattern and combustion stability of a swirl-cup combustor. *Fuel*. 2015 Jan 1;139:529-36.
- 6- Cai B, Song H, Wu Y, Jia M, Zhang Z. Experimental investigation on swirling spray forced ignition of embedded multi-channel plasma igniter. *Acta Astronautica*. 2021 Feb 1;179:670-9.
- 7- Kang Z, Wang ZG, Li Q, Cheng P. Review on pressure swirl injector in liquid rocket engine. *Acta Astronautica*. 2018 Apr 1;145:174-98.
- 8- Jeong S, Yoon Y. Sheet-breakup characteristics of a closed-type swirl injector considering internal flow instability. *Acta Astronautica*. 2021 Sep 1;186:363-71.
- 9- Cui J, Lai H, Li J, Ma Y. Visualization of internal flow and the effect of orifice geometry on the characteristics of spray and flow field in pressure-swirl atomizers. *Applied Thermal Engineering*. 2017 Dec 25;127:812-22.
- 10- Rostami E, Moghaddam HM. Distribution function and atomization parameters of petroleum fuels sprays: An experimental and numerical study. *Results in Engineering*. 2024 Mar 1;21:101692.
- 11- Lefebvre AH, McDonell VG. Atomization and sprays. *CRC Press*; 2017 Mar 27.
- 12- Shafae M, Elkaie A, Hassani MA. Experimental investigation on fluid structure and full-cone spray characteristics of a jet-swirl atomizer using shadowgraph technique. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2022 Jun;236(8):1502-14.
- 13- Fansler TD, Parrish SE. Spray measurement technology: a review. *Measurement Science and Technology*. 2014 Dec 1;26(1):012002.
- 14- Vankeswaram SK, Deivandren S. Size and velocity characteristics of spray droplets in near-region of liquid film breakup in a swirl atomizer. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2022 Jan 1;130:110505.
- 15- Dhivyaraja K, Gaddes D, Freeman E, Tadigadapa S, Panchagnula MV. Dynamical similarity and universality of drop size and velocity spectra in sprays. *Journal of Fluid Mechanics*. 2019 Feb;860:510-43.
- 16- Liu C, Liu F, Yang J, Mu Y, Hu C, Xu G. Experimental investigations of spray generated by a pressure swirl atomizer. *Journal of the Energy Institute*. 2019 Apr 1;92(2):210-21.
- 17- Dafsari RA, Lee HJ, Han J, Lee J. Evaluation of the atomization characteristics of aviation fuels with different viscosities using a pressure swirl atomizer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019 Dec 1;145:118704.
- 18- Jedelsky J, Maly M, Del Corral NP, Wigley G, Janackova L, Jicha M. Air-liquid interactions in a pressure-swirl spray. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018 Jun 1;121:788-804.

-
- 32- Panão MR. Why drop size distributions in sprays fit the lognormal. *Physics of Fluids*. 2023 Jan 1;35(1).
- 33- Villermaux E, Marmottant P, Duplat J. Ligament-mediated spray formation. *Physical Review Letters*. 2004 Feb 20;92(7):074501.
- 34- Eggers J, Villermaux E. Physics of liquid jets. *Reports on Progress in Physics*. 2008 Feb 21;71(3):036601.
- 35- Kooij S, Sijs R, Denn MM, Villermaux E, Bonn D. What determines the drop size in sprays?. *Physical Review X*. 2018 Jul 1;8(3):031019.