

Extraction of a Theoretical Energy-based Model to Estimate Mean Droplet Diameter of the Swirl Injector Spray

H.Karimaei^{1*} and S.M.Hoseinalipour²

1. Department of Aerospace Research Institute, Science Research and Technology

2. Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology

*Postal Code: 15875-1774, Tehran, IRAN

taei@mut.ac.ir

The droplet formation stage of a spray, which enjoys a great diversity in size and droplet velocity, is predictable through a statistical approach. Since the available methods require experimental data such as mean droplet diameter and mean droplet velocity as inputs to estimate the distribution of the droplets, this study attempts to propose a consistent theoretical model based on the energy conservation equation for the estimation of mean droplet diameter to be used in the predictive models of droplet size distribution, such as maximum entropy model. Therefore, those models can be independent of experimental data. The parameters needed in the model, such as atomization efficiency and the Weber number are provided using a CFD model. Then, a parametric study to evaluate the relationship between the atomization efficiency and spray velocity, and mean droplet diameter is carried out. This new proposed model entitled energy-based model (EBM) can provide a very good prediction of mean droplet diameter in comparison with the available experimental data.

Keywords: Swirl injector, Mean droplet diameter, Energy-based model, Atomization efficiency, Weber number

1. Assistant Professor (Corresponding Author)
2. Associate Professor

استخراج یک مدل نظری انرژی-مبنا به منظور تخمین قطر میانگین قطرات اسپری خروجی از یک انژکتور گریز از مرکز

حدیثه کریمایی^{۱*} و سیدمصطفی حسینعلی پور^۲

۱- پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

*تهران، کدپستی: ۱۴۶۵۷۷۴۱۱۱

karimaei@ari.ac.ir

پیش‌بینی نحوه توزیع قطر و سرعت قطرات اسپری به پارامترهای مختلفی چون خصوصیات فیزیکی، سرعت سیال و محیط‌گازی اطراف و هندسه داخلی انژکتور بستگی دارد. مرحله تشکیل قطرات که دارای تنوع فراوان از نظر قطر و سرعت قطرات است، با یک دیدگاه آماری قابل پیش‌بینی است. از آنجا که روش‌های نظری موجود برای تخمین توزیع قطر و سرعت قطرات نیازمند داده‌های تجربی نظیر قطر میانگین و سرعت میانگین قطرات به عنوان ورودی هستند، در این مقاله، تلاش شده است تا با پیشنهاد یک روش نظری بر پایه معادله بقای انرژی، قطر میانگین قطرات را به دست آورد و به جای داده تجربی در مدل‌های پیش‌بینی‌کننده توزیع قطر قطرات نظیر مدل ماکزیمم آنتروپی استفاده کرد. بدین ترتیب با حفظ دقت خوب، آن مدل‌های پیش‌بینی‌کننده توزیع قطر قطرات نیز می‌توانند به داده‌های تجربی وابستگی کمتری پیدا کنند. پارامترهای لازم این مدل نظیر راندمان اتمیزاسیون و عدد وبر نیز از مدل دینامیک سیالات محاسباتی تأمین شده‌اند. سپس یک مطالعه پارامتریک به منظور بررسی ارتباط میان راندمان اتمیزاسیون و سرعت اسپری با قطر میانگین قطرات انجام شده است. این مدل پیشنهادی جدید، به عنوان یک مدل سریع و ساده، در مقایسه با داده‌های تجربی در دسترس، پیش‌بینی خوبی از قطر میانگین قطرات به دست داده است.

واژه‌های کلیدی: انژکتور گریز از مرکز، قطر میانگین قطره، مخروط اسپری، بقای انرژی، راندمان اتمیزاسیون

		علائم و اختصارات	
Re	$\rho_1 U^2 h / \mu_1$		
$1/\bar{R}$	انحنای (1/m)		
\dot{S}	فلاکس مساحت سطح سیال مایع (m ² /s)	d	قطر قطره (m)
U	سرعت (m/s)	D	قطر نازل (m)
We	عدد وبر ($\rho u^2 D / \sigma$)	e	انرژی داخلی (J/kg)
η	راندمان اتمیزاسیون (-)	g	شتاب جاذبه (m/s ²)
σ	کشش سطحی (kg/s ²)	\dot{m}	نرخ جریان جرمی (kg/s)
G	گاز	P	فشار استاتیک (Pa)
L	مایع		
i, j, k	شماره هر ورودی و خروجی		

۱. استادیار (نویسنده مخاطب)

۲. دانشیار

ورودی
خروجی

in
out

مقدمه

فرایند پودرسازی (اتمیزاسیون)^۳ را می‌توان به صورت فرایندی که در آن حجمی از مایع به تعداد زیاد قطره تبدیل می‌شود تعریف کرد. اطلاع از ساز و کار^۴ اتمیزاسیون و اندازه قطرات حاصله، برای مثال، جهت فرآیند احتراق و پایداری در محفظه و بررسی میزان مصرف سوخت، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۲]. افزایش سطح مؤثر تماس قطرات با گاز محیط، موجب افزایش نرخ انتقال حرارت و بهبود اختلاط و تبخیر می‌شود. همچنین کاهش قطر ذرات سوخت باعث راه‌اندازی آسان‌تر موتور، سوخته شدن کامل‌تر سوخت و تولید آلاینده‌های کمتر می‌شود که موجب بهبود احتراق در بسیاری کاربردهای صنعتی از قبیل توربین‌های گاز و کوره‌های صنعتی می‌شود [۳].

با وجود اهمیت و نقش اساسی مکانیزم اتمیزاسیون، اطلاعات کمی درباره فیزیک این مکانیزم در اختیار است. پیچیدگی‌های بسیاری در مکانیزم پودر شدن سیال وجود دارد که تحلیل آن را دشوار می‌سازد. مدل‌های قدیمی برای به دست آوردن قطر میانگین قطرات (SMD)، همه از نوع روش‌های تجربی بوده‌اند که از جمله آنان می‌توان به رزین-راملر، نوکیاما- تاناساوا، لاگ- نرمال و لاگ- کرنل اشاره کرد [۲-۳]. از سه دهه گذشته، مدل‌های نظری نظیر مدل ماکزیمم آنتروپی برای به دست آوردن توزیع قطرات رایج شده است که این مدل‌ها نیاز به ورودی تجربی دارند [۴]. از مهم‌ترین ورودی‌های تجربی، اندازه قطر میانگین قطرات است تا تخمین توزیع قطر قطرات پیرامون آن انجام بگیرد. برای به دست آوردن قطر میانگین قطرات علاوه بر اندازه‌گیری تجربی، روش‌های تحلیلی نظیر تحلیل ناپایداری لایه سیال خروجی از انژکتور نیز تاکنون استفاده شده است [۴-۵]. با استفاده از این مدل طول موج ناپایدارترین موج روی لایه سیال که سبب شکست لایه می‌شود، تخمین زده می‌شود و چون این طول موج با اندازه قطر میانگین قطرات رابطه دارد، مقدار قطر قطرات می‌تواند تخمین زده شود. اما این روش بسیار روش پیچیده و زمان‌بری است و پیاده‌سازی آن مستلزم فرآیند پیچیده و مشکلی است. شایان ذکر است که اساس روش تحلیل ناپایداری بر معادلات مومنوم استوار است.

در گذشته، تلاش‌های فراوانی برای به دست آوردن قطر میانگین قطرات صورت گرفت. روش محاسباتی نیز بدین صورت

بود که یک سری روابط تجربی برای انواع مختلف نازل پیشنهاد شد [۶-۷]. بنابراین وجود یک مدل آسان که مستقل از اندازه‌گیری تجربی باشد و در عین حال نیز پیچیده و زمان‌بر نباشد، به عنوان یک ابزار مهندسی مناسب می‌تواند بسیار مفید باشد.

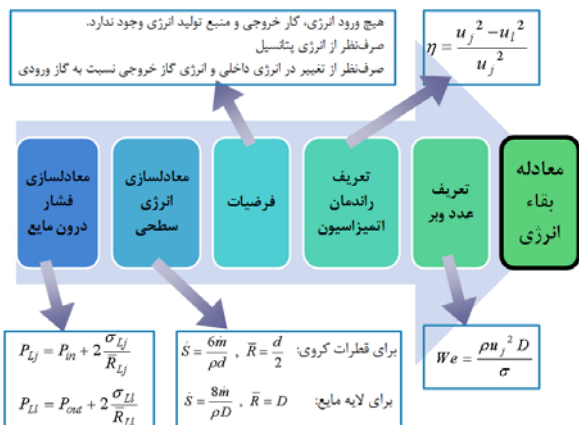
پارک و همکاران [۸] مدلی را توسعه دادند که در آن شبیه‌سازی جامعی از اسپری حاصل از یک جت پرسرعت مایع انجام گرفت. آنان فرآیند اتمیزاسیون اولیه را به صورت کاملاً غیرخطی با استفاده از روش المان مرزی با فرض جریان غیرلزج و متقارن محوری پیاده‌سازی نمودند. تحلیل آنها با وجود شرایط ساده‌کننده زیاد و بدون در نظر گرفتن اثرات چرخشی و یا تاثیر گاز پرسرعت بود که چندان موفق عمل نکرد. یون و دسجاردین [۹] چندین مدل بر اساس تئوری خطی برای خرد شدن جت استفاده کردند تا به نوعی بتوانند آن را شبیه‌سازی کنند. آن‌ها پروفیل سرعت چرخشی سیال را به صورت گردابه آزاد و گردابه جامد در نظر گرفتند. آن‌ها نشان دادند که در اعداد وبر چرخشی بالا، نرخ رشد ماکزیمم و عدد موج محوری، برای گردابه آزاد بیشتر از گردابه جامد است.

با عطف به توضیحات فوق، در مقاله حاضر تلاش شده است تا از یک دیدگاه متفاوت بتوان تخمین خوبی از اندازه قطر میانگین قطرات اسپری بدست آورد که از لحاظ پیاده‌سازی، ساده‌تر و سریع‌تر باشد و در عین حال یک تخمین مناسب بدست دهد. با این هدف، یک مدل کاملاً تحلیلی بر مبنای معادله انرژی مبتنی بر جنبه قطعی فرآیند اتمیزاسیون استخراج شد و نتایج آن با داده‌های تجربی در دسترس مقایسه شد. مدل پیشنهادی این مزیت را دارد که به داده‌ها و یا ضرایب تجربی نیاز ندارد. مدل توسعه یافته حاضر برای یک انژکتور صنعتی که توسط محققان پیشین [۴] آزمایش تجربی گردیده است، پیاده‌سازی و بحث و بررسی می‌شود. این انژکتور دارای چهار ورودی مماسی می‌باشد که با هدایت جریان از طریق این ورودی‌ها به داخل انژکتور، جریان در آن به صورت پیچشی درآمده و از اینرو در خروج از انژکتور به صورت مخروط توخالی درمی‌آید. وارد شدن سیال با سرعت زاویه‌ای بالا به درون محفظه چرخش انژکتور، باعث ایجاد چرخش سیال در آن می‌شود که سبب می‌شود در قسمت مرکزی فضای درونی انژکتور، ناحیه‌ای عاری از سیال یا به اصطلاح حفره هوا به وجود آید و لایه سیال نازک به دیواره بچسبند. کاربرد این نوع انژکتور در بسیاری از صنایع و بطور گسترده در راکت‌های سوخت مایع برای تزریق سوخت و یا اکسیدکننده است [۱-۲]. از آنجا که قطر میانگین قطرات یک اسپری، از مهم‌ترین مشخصه‌های اسپری می‌باشد، مدل تحلیلی مذکور برای انژکتورهای با اسپری مخروطی توخالی استخراج شد تا با حداقل هزینه محاسبات و زمان، تخمین مناسبی از این پارامتر به دست آورده شود.

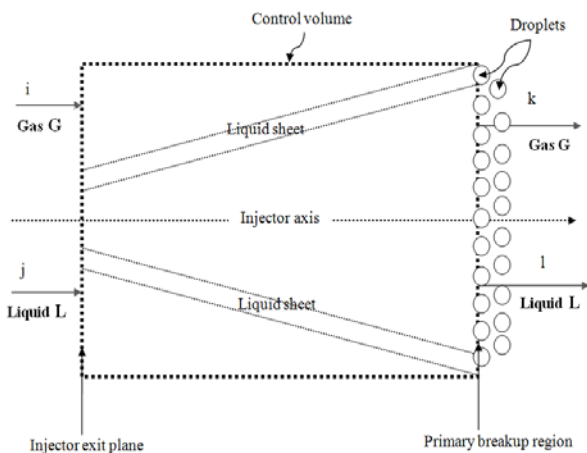
اولیه) در نظر گرفته شده است. معادله (۱) قانون بقاء انرژی را نشان می‌دهد که برای حجم کنترل مذکور نوشته شده است. فرض می‌شود که هیچ ورود انرژی، کار خروجی و منبع تولید انرژی وجود ندارد. بنابراین انرژی گاز و مایع شامل آنتالپی کل، انرژی جنبشی، پتانسیل و نیز انرژی آزاد سطحی مایع در این معادله‌ی بالانس انرژی در نظر گرفته می‌شوند.

$$\begin{aligned} & -\dot{m}_{Gi} \left[e_{Gi} + \frac{P_{in}}{\rho_{Gi}} + \frac{1}{2} u_{Gi}^2 + gZ_{in} \right] + \\ & + \dot{m}_{Lj} \left[e_{Lj} + \frac{P_{Lj}}{\rho_{Lj}} + \frac{1}{2} u_{Lj}^2 + gZ_{in} \right] + \\ & + \sigma_{Lj} \dot{S}_{Lj} = -\dot{m}_{Gk} \left[e_{Gk} + \frac{P_{out}}{\rho_{Gk}} + \frac{1}{2} u_{Gk}^2 + gZ_{out} \right] + \\ & + \dot{m}_{Ll} \left[e_{Ll} + \frac{P_{Ll}}{\rho_{Ll}} + \frac{1}{2} u_{Ll}^2 + gZ_{out} \right] + \sigma_{Ll} \dot{S}_{Ll} \end{aligned} \quad (1)$$

فشار درون مایع برای مایع ورودی و خروجی معادل با مجموع فشار گاز محیط و فشار لاپلاس است که به صورت معادله (۲) می‌باشد.



شکل ۱۹- فلوجارت استخراج مدل انرژی-مینا



شکل ۲۰- حجم کنترل مفروض

در این مقاله، برای تامین پارامترهای مدل استخراج شده (انرژی-مینا)، از مدل دینامیک سیالات محاسباتی که قبلاً توسط نویسندگان برای این انژکتور پیاده‌سازی شده بود [۱۰]، بهره گرفته شد. بدین ترتیب که از مدل دینامیک سیالات محاسباتی پارامترهای مورد نیاز شامل راندمان اتمیزاسیون و عدد وبر تخمین زده شد. این مطالعه برای اولین بار در سطح جهانی انجام شده است و تا کنون مدلی از دیدگاه اصل بقاء انرژی برای پیش‌بینی مشخصات کلی اسپری توسعه داده نشده است. حال آنکه مطالعات پیشین از دیدگاه معادله مومنتوم (اندازه حرکت) به مسئله نگاه کرده‌اند. مدل پیشنهادی، یک مدل ساده و سریع با کمترین میزان حجم محاسباتی می‌باشد و از همین رو است که می‌توان از آن به عنوان یک روش مناسب برای تخمین قطر میانگین قطرات استفاده کرد و یا از آن به عنوان ورودی لازم برای روش‌هایی نظیر روش ماکزیمم آنتروپی (که برای تخمین توزیع سایز قطرات استفاده می‌شوند) بهره برد. بدست آوردن قطر میانگین قطرات یک اسپری همواره به عنوان یک چالش مطرح بوده است، چون نیاز مبرم مدل‌های توزیع سایز می‌باشد. این پارامتر یا باید از نتایج تجربی بدست می‌آید (که نیازمند تجهیزات پیشرفته نظیر PDPA^۵ است) یا باید از مدل‌های پیچیده تحلیل ناپایداری امواج سطحی لایه سیال (مدلی بر پایه مومنتوم) استخراج می‌شود که هزینه محاسباتی بالا و پارامترهای دخیل زیادی دارند. اما مدل پیشنهادی تا حدود زیادی می‌تواند به رفع این مشکل کمک نماید.

۲ مدل نظری سازگار بر پایه قانون بقاء انرژی

در این بخش تلاش شده است تا روش جدیدی برای تخمین قطر میانگین قطرات اسپری استخراج شود. این روش بر دیدگاه غیر مومنتومی برای تخمین قطر میانگین قطرات اسپری استوار است و آن دیدگاه، معادله انرژی است. در تحقیقات پیشین علاوه بر اندازه‌گیری تجربی، از روش‌های تحلیلی نظیر تحلیل ناپایداری لایه سیال برای تخمین قطر میانگین قطرات اسپری استفاده می‌شود که این روش بر پایه معادلات پیوستگی و مومنتوم پایه‌گذاری شده است.

در ادامه، قانون بقاء انرژی برای فرآیند اتمیزاسیون شرح داده می‌شود و به کمک یک سری فرضیات، ساده‌سازی می‌گردد. سپس یک رابطه برای محاسبه قطر میانگین قطرات اسپری پیشنهاد می‌شود. شکل (۱) فلوجارت استخراج مدل انرژی-مینا را نشان می‌دهد. یک حجم کنترل مطابق شکل (۲) در حد فاصل صفحه دهانه خروجی انژکتور تا ناحیه تشکیل قطرات اولیه (محل شکست

با استفاده از معادله (۷) در معادله (۶) و بیرون کشیدن عدد بی‌بعد وبر از میان پارامترها، رابطه (۸) برای برآورد قطر میانگین قطرات اسپری بدست آمد:

$$\frac{d}{D} = \frac{20}{\eta We + 20} \quad (7)$$

که در آن:

$$We = \frac{\rho u_j^2 D}{\sigma} \quad (8)$$

روش پیشنهادی به عنوان یک مدل انرژی-مینا، توانایی محاسبه محدوده‌ای از قطر میانگین قطرات را بدون استفاده از هیچ پارامتر و داده‌ی تجربی دارا می‌باشد. همانطور که از رابطه (۸) مشهود است، قطر میانگین قطرات با معکوس عدد وبر و راندمان اتمیزاسیون متناسب است.

۳ تخمین قطر میانگین قطرات به وسیله‌ی مدل

انرژی - مینا

در شکل (۳) ترسیم رابطه (۸) که قطر میانگین قطرات بر حسب راندمان اتمیزاسیون را نشان می‌دهد، ارائه شده است. بر اساس رابطه (۷)، بیشینه راندمان اتمیزاسیون (η_{max}) هنگامی به دست می‌آید که نسبت کاهش در انرژی جنبشی به انرژی ورودی به حجم کنترل حداکثر شود، البته با این فرض که هیچ تلفات انرژی دیگری وجود نداشته باشد. با در نظر گرفتن یک چنین شرایطی که در آن راندمان اتمیزاسیون بیشینه می‌باشد، مطابق معادله (۸) و (۹) کمینه قطر میانگین قطرات به دست می‌آید. حتی در شرایط غیرممکن راندمان برابر با یک، حداقل قطر میانگین قطرات، معادل ۹ میکرون به دست خواهد آمد. برای آنژکتور صنعتی تحت مطالعه‌ی این مقاله، با توجه به نتایج بدست آمده در خصوص تخمین سرعت میانگین خروجی بر اساس تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی جریان در آنژکتور [۱۰] (که همخوانی خوبی با نتایج در دسترس از آزمون تجربی [۴] دارد)، میزان راندمان اتمیزاسیون را می‌توان تخمین زد. شکل (۴)، توزیع اندازه سرعت در لایه سیال و حفره هوا را بر روی خط قطری دهانه نازل آنژکتور نشان می‌دهد [۱۰]. شکل (۵) اندازه سرعت نزدیک محل شکست اولیه را نشان می‌دهد [۱۰]. با استفاده از این نمودارها، سرعت میانگین لایه سیال در خروجی نازل و نزدیک محل شکست بدست می‌آیند که بدین ترتیب می‌توان راندمان اتمیزاسیون را تخمین زد. میزان راندمان اتمیزاسیون با توجه به کاهش ۶ درصدی سرعت، برابر ۱۱/۸ درصد برآورد می‌شود.

$$P_{Lj} = P_{in} + 2 \frac{\sigma_{Lj}}{R_{Lj}} \quad (2)$$

$$P_{Ll} = P_{out} + 2 \frac{\sigma_{Ll}}{R_{Ll}}$$

با جایگذاری معادلات (۲) در معادله (۱) و با در نظر گرفتن فرضیاتی که در ادامه بیان شده‌اند، معادله (۳) به دست می‌آید. در این معادله، از انرژی پتانسیل صرف‌نظر شده است. همچنین از تغییر در انرژی داخلی صرف‌نظر شده است، زیرا تغییرات آن به اندازه کافی کوچک‌تر از تغییرات در انرژی جنبشی است. همچنین هیچ تغییری در انرژی گاز خروجی نسبت به گاز ورودی وجود ندارد.

$$\sigma \left[\left(\frac{2\dot{m}_{Ll}}{\rho_{Ll} R_{Ll}} + \dot{S}_{Ll} \right) - \left(\frac{2\dot{m}_{Lj}}{\rho_{Lj} R_{Lj}} + \dot{S}_{Lj} \right) \right] = \frac{1}{2} (\dot{m}_{Lj} u_{Lj}^2 - \dot{m}_{Ll} u_{Ll}^2) \quad (2)$$

این معادله نشان می‌دهد که افزایش در فشار لاپلاس و انرژی آزاد سطح به معنی کاهش در انرژی جنبشی است. یعنی اینکه در فرآیند اتمیزاسیون، انرژی جنبشی به فشار لاپلاس و انرژی آزاد سطح تبدیل می‌شود. بنابراین بر اساس معادله بدست آمده از قانون بقا انرژی، باید بتوان قطر میانگین قطرات (d) را تخمین زد. معادلات (۴) و (۵) ارتباط نرخ جریان جرمی و فلاکس مساحت سطح سیال مایع را به ترتیب برای قطرات کروی و لایه مایع ارائه می‌کنند.

$$\dot{S} = \frac{6\dot{m}}{\rho d}, \quad \bar{R} = \frac{d}{2} \quad (3)$$

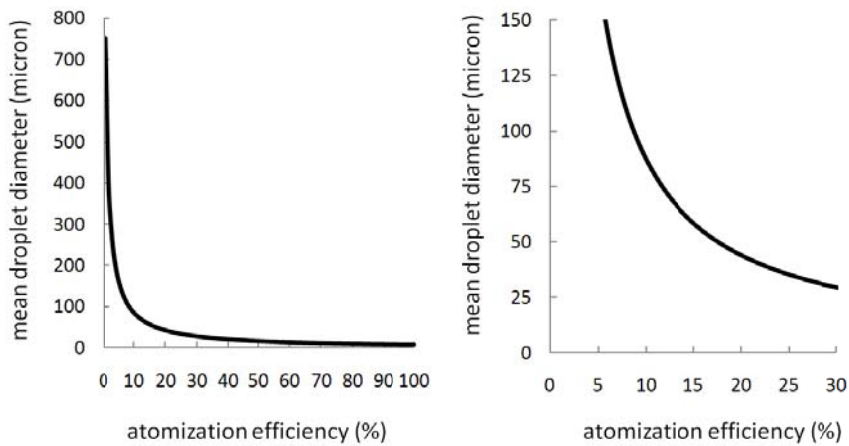
$$\dot{S} = \frac{8\dot{m}}{\rho D}, \quad \bar{R} = D \quad (4)$$

فرض می‌شود که لایه مایع به حجم کنترل وارد می‌شود و قطرات کروی از آن خارج می‌شوند. بنابراین معادله (۶) با جایگذاری معادلات (۴) و (۵) در معادله (۳) بدست می‌آید.

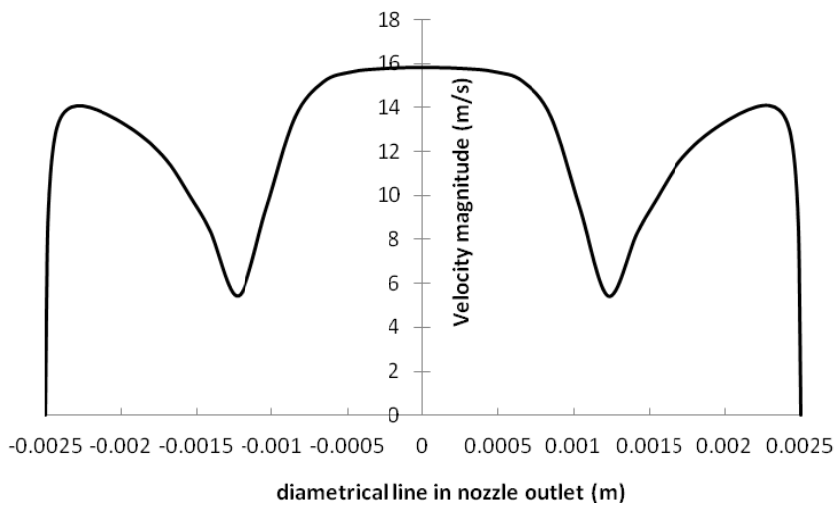
$$\frac{20\sigma}{\rho} \left[\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right] = u_j^2 - u_l^2 \Rightarrow d = \frac{20\sigma D}{\rho D(u_j^2 - u_l^2) + 20\sigma} \quad (5)$$

به منظور بدست آوردن یک رابطه فرمولی، یک پارامتر به عنوان راندمان اتمیزاسیون (η) تعریف می‌شود. راندمان اتمیزاسیون، نسبت کاهش در انرژی جنبشی به انرژی سیال ورودی را نشان می‌دهد. معادله (۷) راندمان اتمیزاسیون را ارائه می‌کند.

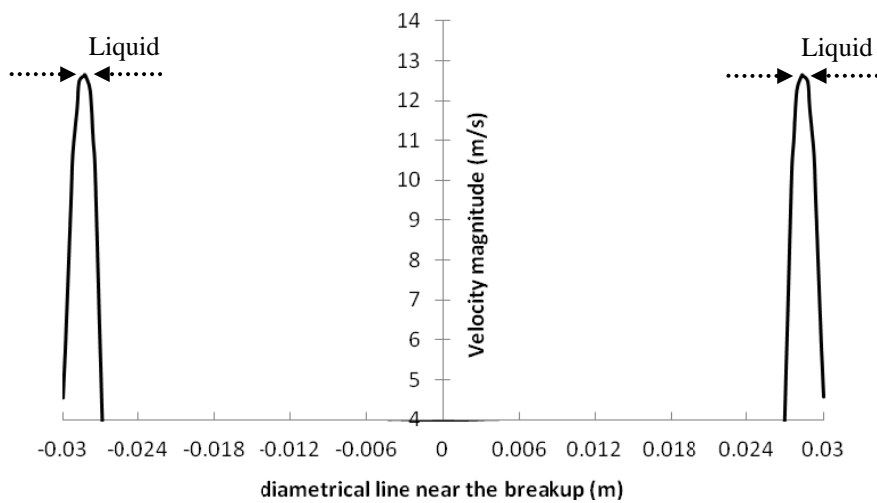
$$\eta = \frac{u_j^2 - u_l^2}{u_j^2} \quad (6)$$



شکل ۲۱ - ترسیم رابطه (۸) - قطر میانگین قطرات بر حسب راندمان اتمیزاسیون

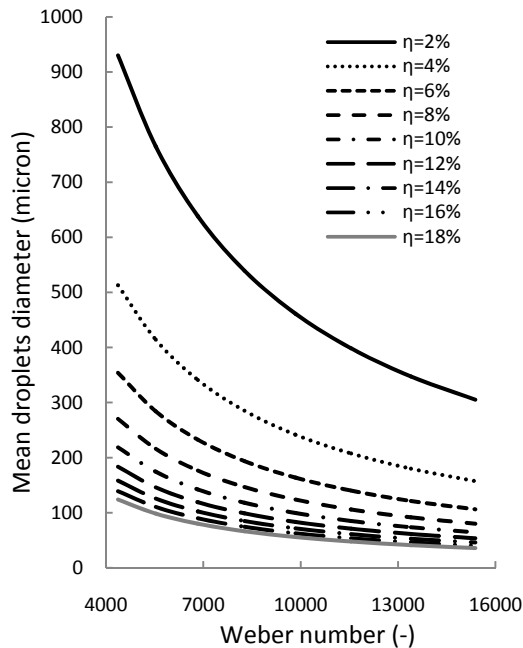


شکل ۲۲ - توزیع اندازه سرعت در لایه سیال و حفره هوا را بر روی خط قطری دهانه نازل [۱۰]

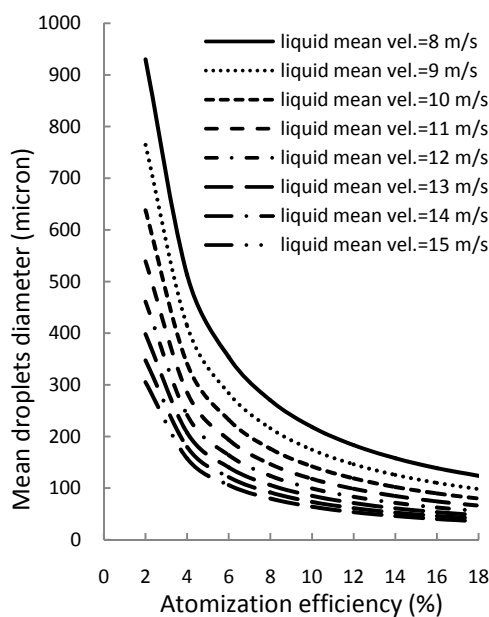


شکل ۲۳ - اندازه سرعت نزدیک محل شکست اولیه [۱۰]

از دیدگاه دیگری، شکل (۷) به منظور بررسی تاثیر راندمان اتمیزاسیون روی قطر میانگین قطرات به ازای سرعت‌های مختلف لایه سیال در محدوده‌ی ۸-۱۵ متر بر ثانیه، استخراج شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش سرعت لایه سیال، قطرهای میانگین کوچکتری برای قطرات حاصل می‌شود. در واقع هر تغییری در پارامترهای اسپری، تعادل میان نیروهای عملی را بر هم‌زده و منجر به تغییر در مشخصه‌های اسپری می‌گردد.



شکل ۲۴ - قطر میانگین قطرات بر حسب عدد وبر به ازای راندمان‌های اتمیزاسیون مختلف



اندازه سرعت میانگین در خروجی برابر ۱۳/۵ متر بر ثانیه است که اندکی قبل از شکست لایه به ۱۲/۷ متر بر ثانیه می‌رسد. با مراجعه به شکل (۳) اندازه قطر میانگین قطرات به کمک مدل، در حدود ۷۰ میکرون به دست می‌آید. از طرفی قطر قطرات میانگین پاشش حاصل از اندازه‌گیری تجربی برای این انژکتور در حدود ۷۵ میکرون گزارش شده است [۴]. ملاحظه می‌گردد که این روش، تخمین بسیار خوبی از اندازه قطر میانگین قطرات حاصل از شکست اولیه را می‌تواند بدست دهد که در مقایسه با داده تجربی در حدود ۷ درصد انحراف دارد. مشخصات عملکردی این انژکتور نیز به صورت جدول (۱) و مشخصات کلی هندسی آن به صورت جدول (۲) است.

جدول ۱ - مشخصات عملکردی انژکتور

ضخامت لایه سیال t (mm)	زاویه پاشش 2α (deg)	فشار تزریق Δp (bar)	دبی جرمی \dot{m}_ϕ (kg/s)
۰/۵۵	۱۰۰	۴/۵	≈۰/۰۸

جدول ۲ - مشخصات هندسی انژکتور (بر حسب میلی‌متر)

قطر محفظه چرخش انژکتور	طول نازل انژکتور	قطر ورودی‌های مماسی	قطر نازل خروجی
۸	۵۰	۱.۳	۵

تحلیل پارامتریک

شکل (۶) به منظور بررسی اثر عدد وبر بر روی قطر میانگین قطرات به ازای راندمان‌های اتمیزاسیون مختلف در محدوده‌ی ۲-۱۸٪، ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که اعداد وبر کوچکتر منجر به قطر میانگین بزرگتری برای قطرات می‌شوند. به علاوه بدیهی است که وقتی راندمان اتمیزاسیون بیشتر باشد، قطر میانگین قطرات کوچکتر می‌گردد. از لحاظ فیزیکی اتفاقی که می‌افتد این است که اعداد وبر کوچکتر به معنای دبی جرمی جریان کمتر است. با کاهش دبی جرمی جریان، تاثیر کشش سطحی بر شکست لایه سیال افزایش می‌یابد و قطرات علاوه بر اینکه در فاصله بیشتری نسبت به دهانه نازل پدید می‌آیند، دارای اندازه‌های بزرگتر نیز می‌شوند زیرا کشش سطحی تمایل دارد که با نیروهای آئروپنایمیک جهت تشکیل قطرات ریزتر مقابله کند و از اینرو سطح بزرگتری را برای قطرات رقم بزند. از طرف دیگر، راندمان اتمیزاسیون نماینده‌ای از کیفیت اتمیزاسیون هست که هر چه بالاتر باشد، قطرات ریزتری تولید خواهند شد. راندمان بیشتر از لحاظ فیزیکی به معنای این است که کاهش شتاب لایه سیال خروجی از انژکتور بیشتر است و این یعنی نیروهای آئروپنایمیک در حال غلبه بر نیروهای مقاومی نظیر کشش سطحی هستند که تمایل به شکستن لایه سیال و تشکیل قطرات را ندارند. بنابراین مطابق انتظار، باید قطرات ریزتر تشکیل شوند که برای مدل پیشنهادی در این مقاله نیز چنین است.

مراجع

- [1] Fritsching, U., *Spray Simulation*, 3rd Edition, London, Cambridge University Press, 2004.
- [2] Lefebvre, AH., *Atomization and Sprays*, 1st Edition, Washington, Hemisphere Publishing, 1989.
- [3] Babinsky, E. and Sojka, PE., "Modeling Droplet Size Distributions," *Progr Energy Combust Sci*, Vol. 28, 2002, pp. 303-329.
- [4] Movahednejad, E., Prediction of Size and Velocity Distribution of Droplets in Spray by Maximum Entropy Principle and Using Wave Instability, (Thesis??), Tehran, Tarbiat Modares University, 2010.
- [5] Ashgriz, N., *Handbook of Atomization and Sprays In: Theory and Applications*, 2nd Edition, New York, Springer, 2011.
- [6] Liu, H., *Science and Engineering of Droplets: Fundamentals and Applications, Materials Science and Process Technology*, 2nd Edition, Utah, William Andrew, 2000.
- [7] Bordas, R., John, V., Schmeier, E. and Thevenin, D., "Measurement and Simulation of a Droplet Population in a Turbulent Flow Field," *Computers & Fluids*, 66, 2012, pp. 52-62.
- [8] Park, H., Yoon, SS. and Heister, SD., "A Nonlinear Atomization Model for Computation of Drop Size Distributions and Spray Simulations," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 48, 2005, pp. 1219-1240.
- [9] Yoon, SS. and Des Jardin, PE. "Modeling Spray Impingement using Linear Stability Theories for Droplet Shattering," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 50, 2006, pp. 469-489.
- [10] Hosseinalipour, S. M., Karimaei, H. and Ommi, F., "Design, Numerical Simulation and Test of a Swirl Injector with Tangential Inlets," *Journal of Fuel and Combustion*, Vol.7, 1393, pp. 26-42 (In Persian).

شکل ۲۵ - قطر میانگین قطرات بر حسب راندمان اتمیزاسیون به ازای اعداد وبر مختلف

نتیجه گیری

در این مقاله برای تخمین قطر میانگین قطرات اسپری از دیدگاه معادله انرژی استفاده شد و یک رابطه بر حسب راندمان اتمیزاسیون و عدد وبر استخراج گردید. قطر میانگین بدست آمده از مدل نظری انرژی-مینا با داده‌های تجربی در دسترس مقایسه شد. نتایج نشان داد که این مدل، پتانسیل استفاده شدن به عنوان یک ابزار مهندسی در مراحل اولیه طراحی را دارد. به کارگیری مدل نظری انرژی-مینا می‌تواند تخمین خوبی از قطر میانگین قطرات بدست دهد و به عنوان یک روش سریع و ساده با حجم محاسبات بسیار کمتر نسبت به روش‌های پیچیده‌ای نظیر تحلیل ناپایداری خطی و غیرخطی (که بر پایه معادلات مومنتوم هستند)، می‌تواند یک تخمین اولیه مناسب از قطر میانگین قطرات را به شرط محاسبه نسبتاً دقیق راندمان اتمیزاسیون بدست دهد.

یک مطالعه پارامتریک نیز به منظور بررسی اثر عدد وبر روی قطر میانگین قطرات به ازای راندمان‌های اتمیزاسیون مختلف در محدوده‌ی ۲-۱۸٪ انجام گرفت و از دیدگاه دیگری به منظور بررسی تاثیر راندمان اتمیزاسیون روی قطر میانگین قطرات به ازای سرعت‌های مختلف لایه سیال در محدوده‌ی ۸-۱۵ متر بر ثانیه، انجام شد. نتایج نشان داد که اعداد وبر کوچکتر منجر به قطر میانگین بزرگتری برای قطرات می‌شوند. وقتی راندمان اتمیزاسیون بیشتر باشد، قطر میانگین قطرات کوچکتر می‌گردد. با افزایش سرعت لایه سیال نیز قطر میانگین قطرات کوچکتری حاصل می‌شود. در واقع هر تغییری در پارامترهای اسپری، تعادل میان نیروهای اعمالی را بر هم می‌زند و منجر به تغییر در مشخصه‌های اسپری می‌گردد.