



ترکیب مدل جریان داخلی انژکتور با مدل ماکزیمم آنتروپی به منظور پیش بینی توزیع قطر قطرات پاشش

حدیثه کریمایی¹، سید مصطفی حسینعلی پور^{2*}، احسان موحدنژاد³

1- دانش آموخته دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- دانش آموخته دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* صندوق پستی 16846، alipour@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 07 دی 1395

پذیرش: 18 بهمن 1395

ارائه در سایت: 09 اسفند 1395

کلید واژگان:

مدل ماکزیمم آنتروپی

توزیع قطر قطرات

جریان داخلی انژکتور

دیدگاه آماری

عبارت چشمه انرژی

چکیده

پیش بینی نحوه توزیع قطر قطرات اسپری به پارامترهای مختلفی چون خصوصیات فیزیکی، سرعت سیال و محیط گازی اطراف و هندسه داخلی انژکتور بستگی دارد. مرحله تشکیل قطرات دارای تنوع فراوان از نظر قطر و سرعت قطرات می باشد و با یک دیدگاه آماری قابل پیش بینی است. اصل ماکزیمم آنتروپی، یکی از متداول ترین و بهترین روش هایی است که در کنار معادلات بقا برای پیش بینی توزیع سایز قطرات اسپری استفاده شده است. به دلیل اشکالاتی که در این مدل وجود دارد، نتایج حاصل از پیش بینی این مدل با نتایج تجربی به خوبی مطابقت ندارند. از این رو در این مقاله، از یک دیدگاه متفاوت برای بهبود نتایج مدل ماکزیمم آنتروپی استفاده شده است. بدین ترتیب که اصلاح مدل ماکزیمم آنتروپی به وسیله ترکیب این مدل با زیرمدل دینامیک سیالات محاسباتی صورت گرفته است. به کمک زیر مدل دینامیک سیالات محاسباتی و حل عددی جریان داخل انژکتور، عبارت چشمه انرژی با تخمین انرژی جنبشی با دقت بیشتری برآورد شده است و در مدل ماکزیمم آنتروپی استفاده شده است. در واقع با استفاده از این زیرمدل در مدل ماکزیمم آنتروپی، دقت پیش بینی مشخصه های اسپری بهبود داده شده است. همچنین نیاز مدل ماکزیمم آنتروپی به داده های تجربی ورودی نیز کاهش داده شده است. به کمک این مدل ترکیبی، به نوعی اثر بالادست جریان اسپری بر روی توزیع قطر قطرات با دقت خوبی لحاظ گردیده است. نتایج مدل حاضر توافق خوبی را با نتایج تجربی در دسترس نشان داده است.

Coupling of internal flow analysis of an injector and maximum entropy model to predict droplet diameter distribution

Hadiseh Karimaei¹, Seyed Mostafa Hosseinalipour^{1*}, Ehsan Movahednejad²

1- Mechanical Engineering Faculty, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Engineering Faculty, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846, Tehran, Iran, alipour@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 27 December 2016

Accepted 06 February 2017

Available Online 27 February 2017

Keywords:

Maximum entropy principle

droplet diameter distribution

internal flow analysis

statistical approach

energy source term

ABSTRACT

Prediction of spray droplet diameter distribution depends on the various parameters such as physical properties, fluid velocity, and discharge environment and injector geometry. The stage of forming droplets confers a great variety of size and therefore will be predictable with a statistical approach. The maximum entropy principle is one of the best and most popular ways to predict the spray droplet size distribution along with the conservation equations. Due to some drawbacks in this model, the predicted results do not match well with the experimental data. It is suggested the available energy source in the MEP model equation be improved by numerical solution of flow inside the injector based on the CFD technique. This will enhance the calculation accuracy of the turbulent kinetic energy of the output spray. In fact, by using this sub-model in the maximum entropy model, the prediction accuracy of the spray characteristics is improved. Also, the requirement of the maximum entropy model to the experimental data as inputs has been reduced. By the present coupled model, the effect of spray upstream on the droplet size distribution can be considered with good accuracy. The results show a close agreement with the available experimental data.

1- مقدمه

به درون محفظه چرخش افشانک، باعث ایجاد چرخش در آن می گردد که در نتیجه یک افشانه² به صورت لایه نازک سیال که به صورت یک صفحه مخروطی شکل توخالی پخش می شود تولید می گردد [1].

فرآیند قطره افشانی¹ را می توان فرآیندی که در آن حجمی از مایع به تعداد زیاد قطره تبدیل می شود تعریف کرد. وارد شدن سیال با سرعت زاویه ای بالا

² Spray

¹ Atomization

Please cite this article using:

H. Karimaei, S. M. Hosseinalipour, E. Movahednejad, Coupling of internal flow analysis of an injector and maximum entropy model to predict droplet diameter distribution, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 31-36, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

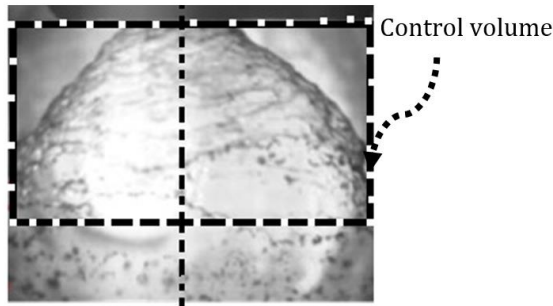


Fig. 1 Control volume of conical spray

شکل 1 حجم کنترل پاشش مخروطی شکل

تشخیص و طرح مناسب معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی جهت تحلیل سیستم‌های پاشش می‌باشد.

با توجه به معادلات حاکم ماکزیمم آنتروپی، معادلات بقا می‌توانند به صورت ترم‌هایی از تابع چگالی احتمال p_{ij} بیان شوند. احتمال پیدا کردن قطره‌ای با حجم V_i و سرعت u_j را نشان می‌دهد. بنابراین معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned} \sum_i \sum_j p_{ij} V_i \rho \dot{n} &= \dot{m}_o + S_m \\ \sum_i \sum_j p_{ij} V_i \rho \dot{n} u_j &= \dot{J}_o + S_{mu} \\ \sum_i \sum_j p_{ij} \dot{n} (V_i \rho u_j^2 + 2\sigma A_i) &= \dot{E}_o + S_e \end{aligned} \quad (1)$$

در این معادلات، $\dot{n}$ نرخ تولید قطرات در پاشش، $\dot{m}_o, \dot{J}_o, \dot{E}_o$ به ترتیب دبی جرم، اندازه حرکت و انرژی است که از خروجی انژکتور وارد حجم کنترل می‌شود و S_m, S_{mu}, S_e به ترتیب عبارات‌های چشمه برای معادلات جرم، اندازه حرکت و انرژی می‌باشند که برای هر پارامتر اضافی که در این معادلات منظور نشده است، به کار می‌روند. قطرات علاوه بر انرژی جنبشی دارای یک انرژی سطحی می‌باشند که برای تشکیل قطره لازم است. بدین جهت ترم $2\sigma A_i$ در معادله بقای انرژی منظور شده است. شکل مناسب‌تر این معادلات می‌تواند از نرمالیزه کردن معادلات به وسیله $\dot{m}_o, \dot{J}_o, \dot{E}_o$ به دست آید. با توجه به تعریف‌های سرعت متوسط مومنتمی و حجم متوسط قطرات در پاشش، معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی به صورت زیر درمی‌آیند:

$$\begin{aligned} \sum_i \sum_j p_{ij} \left(\frac{V_i}{V_m} \right) &= 1 + \frac{S_m}{\dot{m}_o} \\ \sum_i \sum_j p_{ij} \left(\frac{V_i}{V_m} \right) \left(\frac{u_j}{\bar{u}_o} \right) &= 1 + \frac{S_{mu}}{\dot{J}_o} \\ \sum_i \sum_j p_{ij} \left(\frac{V_i}{V_m} \right) \frac{1}{H} \left[\left(\frac{u_j}{\bar{u}_o} \right)^2 + \hat{B} k_i \right] &= 1 + \frac{S_e}{\dot{E}_o} \end{aligned} \quad (2)$$

که در این معادلات، k_i نسبت مساحت به حجم قطرات در اندازه گروه i می‌باشد.

$$\hat{B} = \frac{2\sigma}{\rho \bar{u}_o^2}, \quad k_i = \frac{V_i}{V_m} \quad (3)$$

و H فاکتور شکل پروفیل سرعت می‌باشد که وقتی پروفیل سرعت خروجی یکنواخت است، مقدار آن برابر 1 می‌باشد.

حجم، سرعت و عبارات‌های چشمه بی‌بعد نیز به صورت زیر تعریف

سه روش در دسترس برای مدل‌سازی توزیع قطرات وجود دارد [2] که عبارتند از روش ماکزیمم آنتروپی (ME)، روش تابع احتمال گسسته (DPF) و روش تجربی. روش تجربی برای مدل‌سازی توزیع اندازه قطره، روشی سنتی محسوب می‌شود. در مقابل روش تجربی، یک دیدگاه تحلیلی درباره مسئله مدل‌سازی توزیع قطرات در سه دهه گذشته توسعه داده شده است که به روش ماکزیمم آنتروپی (ME) موسوم است. پیشگامان روش ماکزیمم آنتروپی، سلنس و بورزتاوسکی [3]، لی و تانکین [4]، تشکیل اسپری را به عنوان فرآیند غیرقطعی که می‌تواند با استفاده از اصل حداکثر آنتروپی (شانون) مشروط به یک مجموعه از قیود کلی فیزیکی (مانند بقای جرم اسپری، انرژی سطحی و جنبشی و...) مدل شود، در نظر گرفتند. این روش مشابه آن چیزی است که در ترمودینامیک آماری استفاده می‌شود. در این روش، اول یک مجموعه قیود فیزیکی مناسب فرموله می‌شود و سپس توزیعی که آنتروپی سیستم را مشروط به آن قیود بیشینه می‌کند، بدست آورده می‌شود.

احمدی¹ و سلنس [5] اولین کسانی بودند که توزیع قطر قطرات را مستقل از توزیع سرعت پیش‌بینی کردند. آن‌ها از معادلات بقای جرم، انرژی سطح و مجموع احتمالات استفاده کردند و نتیجه گرفتند که معادلات بقای مومنتم و انرژی جنبشی تنها حامل اطلاعات مربوط به سرعت هستند. مشکل بزرگ در ترکیب معادلات در روش سلنس این بود که به ازای قطرات بسیار کوچک و حتی با اندازه صفر نیز توزیع عددی پیش‌بینی می‌کرد ولی روش لی و تانکین به ازای قطرات با قطر بسیار کوچک هیچ توزیعی را پیش‌بینی نمی‌کرد.

از نتایج تحقیقات کوزین² و همکاران [6]، مشخص گردید که دیدگاه لی و تانکین قادر به مدل‌سازی صحیح نیست و ماکزیمم آنتروپی را به درستی فرموله نمی‌کند. بنابراین لی و تانکین [7] کار خود را اصلاح کرده و تنها از یک معادله بقای انرژی برای توزیع استفاده کردند. همچنین برای عبارت چشمه مومنتم یک مقدار منفی در نظر گرفتند.

در این مقاله از معادلات حاکم ماکزیمم آنتروپی که توسط لی و تانکین [7] ارائه شده است، برای استخراج معادلات حاکم و تعیین توزیع اندازه و سرعت قطرات استفاده شده است. بدین منظور، یک حجم کنترل در خروجی انژکتور در نظر گرفته می‌شود. خروجی انژکتور به عنوان ورودی حجم کنترل بوده و حجم کنترل تا محل تشکیل قطرات ادامه می‌یابد. در این مقاله، از یک دیدگاه متفاوت برای بهبود مدل ME استفاده شده است. پیشنهاد شده است که بهبود منبع انرژی موجود در معادلات مدل ME با استفاده از حل عددی جریان داخل انژکتور براساس مدل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) انجام گیرد. استفاده از نتایج این زیرمدل در مدل ME، دقت محاسبات انرژی جنبشی توربولانسی اسپری را بهبود خواهد بخشید.

2- مدل ماکزیمم آنتروپی

"شکل 1" حجم کنترل مربوط به انژکتورهای پاشش مخروطی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، فرض شده است که فعل و انفعالات قطره با فاز پیوسته محیط اطراف، خارج از حجم کنترل صورت می‌گیرد و از تبخیر قطرات و برخورد و به هم پیوستن آن‌ها صرف‌نظر شده است. فرآیند تشکیل قطره در داخل حجم کنترل می‌تواند به صورت انتقال از یک حالت تعادلی به حالت تعادلی دیگر در نظر گرفته شود. بنابراین پایه مدل ریاضی،

¹ Ahmadi

² Cousin

می شوند:

$$\begin{aligned} \bar{V}_i &= \frac{V_i}{V_m}, \bar{D}_i = \frac{D_i}{D_m}, \bar{u}_j = \frac{u_j}{u_0} \\ S_{mu} &= \frac{S_m}{m_o}, \bar{S}_{mu} = \frac{S_{mu}}{j_o}, \bar{S}_e = \frac{S_e}{E_o} \end{aligned} \quad (4)$$

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

$$\sum_i \sum_j p_{ij} = 1 \quad (5)$$

بینهایت دسته از توزیع های احتمال p_{ij} وجود دارد که معادلات بقاء و مجموع احتمالات را ارضا می کند. از این مجموعه جواب، مناسب ترین توزیع آن است که آنتروپی شانون¹ (معادله 6) را ماکزیمم کند. شانون [8] شکلی از آنتروپی را بیان کرد که در مسائل فیزیکی و مهندسی کاربرد زیادی دارد.

$$S = -K \sum_i \sum_j p_{ij} \ln p_{ij} \quad (6)$$

با استفاده از روش ضرایب لاگرانژ، توزیع احتمالی که آنتروپی را ماکزیمم نماید بدست می آید:

$$p_{ij} = \exp \left\{ -\lambda_0 - \lambda_1 \bar{V}_i - \lambda_2 \bar{V}_i \bar{u}_j - \lambda_3 \left(\frac{\bar{V}_i \bar{u}_j^2}{H} + \frac{B k_i \bar{V}_i}{H} \right) \right\} \quad (7)$$

عموماً 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 معادلات را به صورت انتگرالی روی اندازه و سرعت قطره نوشت. پس برای به دست آوردن ضرایب لاگرانژ باید دستگاه معادلات زیر حل شود:

$$\begin{cases} \int_{\bar{D}_{\min}}^{\bar{D}_{\max}} \int_{\bar{u}_{\min}}^{\bar{u}_{\max}} f \bar{D}^3 d\bar{u} d\bar{D} = 1 + \bar{S}_m \\ \int_{\bar{D}_{\min}}^{\bar{D}_{\max}} \int_{\bar{u}_{\min}}^{\bar{u}_{\max}} f \bar{D}^3 \bar{u} d\bar{u} d\bar{D} = 1 + \bar{S}_{mu} \\ \int_{\bar{D}_{\min}}^{\bar{D}_{\max}} \int_{\bar{u}_{\min}}^{\bar{u}_{\max}} f \left(\frac{\bar{D}^3 \bar{u}^2}{H} + \frac{B \bar{D}^2}{H} \right) d\bar{u} d\bar{D} = 1 + \bar{S}_e \\ \int_{\bar{D}_{\min}}^{\bar{D}_{\max}} \int_{\bar{u}_{\min}}^{\bar{u}_{\max}} f d\bar{u} d\bar{D} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$f = 3\bar{D}^2 \exp \left\{ -\lambda_0 - \lambda_1 \bar{D}^3 - \lambda_2 \bar{D}^3 \bar{u} - \lambda_3 \left(\frac{\bar{D}^3 \bar{u}^2}{H} + \frac{B \bar{D}^2}{H} \right) \right\}$$

برای حل دستگاه معادلات از روش عددی نیوتن-رافسون استفاده شده است و بدین ترتیب توزیع قطرات به دست آورده شده است.

3- عبارات چشمه²

معادلات به کار رفته در روش ME همواره دارای عبارت های چشمه است که این عبارت ها (جرم، مومنتم و انرژی) براساس مفاهیم فیزیکی قابل تعیین می باشند. آنچه که کاربرد دقیق این معادلات را برای شرایط مختلف ممکن

می سازد، تعیین و محاسبه هرچه بهتر و دقیق تر عبارت های چشمه مربوطه می باشد. چاه یا چشمه انرژی، انرژی هایی هستند که به حجم کنترل وارد و یا از آن خارج می شوند ولی در معادلات حاکم لحاظ نشده اند.

به جز سیالی که از نازل وارد حجم کنترل می شود و قطراتی که پس از تشکیل از حجم کنترل خارج می شوند، اگر جرمی وارد حجم کنترل شود و یا از آن خارج شود، در عبارت چشمه جرم منظور می گردد. اگر در محدوده حجم کنترل بین سیال و فاز پیوسته تبادل مومنتم صورت گیرد، این انتقال مومنتم در عبارت چشمه اندازه حرکت وارد می شود. در معادلات حاکم ماکزیمم آنتروپی، تمامی چاه ها و چشمه های انرژی از قبیل انرژی سینماتیکی، انرژی توربولانی و غیره به عنوان یک عبارت چشمه انرژی (S_e) در نظر گرفته می شوند. در نوشتن معادلات حاکم از پروفیل سرعت میانگین استفاده شده است و بنابراین انرژی جنبشی که از روی این پروفیل سرعت و در ورودی حجم کنترل محاسبه می شود فاقد انرژی توربولانی است. بدین معنی که در جریان های آشفته، سرعت های نوسانی یک انرژی جنبشی اضافی را وارد حجم کنترل می کنند که در معادلات حاکم در نظر گرفته نشده است. بنابراین این انرژی توربولانی که می تواند برای شکست جت و تشکیل قطره مصرف شود، یک چشمه انرژی محسوب می شود و باید در عبارت چشمه انرژی (S_e) وارد شود تا دقت محاسبات افزایش یابد.

انرژی جنبشی توربولانی میانگین در بالادست خروجی نازل که از مدل دینامیک سیالات محاسباتی محاسبه می گردد، برای برآورد نمودن عبارت چشمه که به صورت عبارت زیر ارائه می شود، به کار می رود:

$$\bar{S}_e = \frac{K_t}{\bar{E}_o} = \frac{K_t}{\rho_l U_l^3 A_{\text{cross}}} \quad (9)$$

نیروی پسا (F) روی لایه سیال در معادله مومنتوم به صورت یک عبارت چشمه مومنتوم به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$\bar{S}_{mu} = \frac{F}{j_m} = \frac{F}{\rho_l U_l^2 A_{\text{cross}}} \quad (10)$$

که F نیروی درگ روی لایه سیال است. برای محاسبه نیروی درگ قطرات کروی فرض شده اند.

در ادامه به بررسی تاثیر عبارات چشمه انرژی بر روی توزیع سایز قطرات به دست آمده از مدل ماکزیمم آنتروپی پرداخته شده است تا مشخص گردد که آیا تصحیح یک عبارت چشمه نظیر چشمه انرژی چه اثری در پیش بینی توزیع سایز قطرات ایفا می کند. از این رو تاثیر عبارت چشمه انرژی بر توزیع سایز قطرات مطالعه شده است. در "شکل 2" تغییرات توزیع سایز قطرات پاشش برحسب چشمه انرژی نشان داده شده است. نتایج نشان می دهند که با افزایش چشمه انرژی، توزیع قطر قطرات یکنواخت تر می گردد.

4- مدل جریان داخلی انژکتور

مطالعه بر روی یک نوع انژکتور جریان چرخشی با چهار ورودی مماسی مطابق شماتیک "شکل 3" انجام شده است. تحلیل جریان داخلی انژکتور به منظور در نظر گرفتن تاثیر پارامترهای هندسی بر خصوصیات جریان خروجی از انژکتور به کمک نرم افزار فلوئنت انجام گرفته است.

فرضیات این حل عددی به این صورت است که معادلات ناویر استوکس به صورت تراکم ناپذیر، پایا و سه بعدی حل شده و از معادله انرژی صرف نظر شده است. از اختلاط هوا در سیال ورودی، صرف نظر شده است و اثرات هوای محلول در مایع ورودی دیده نشده است. سطح مشترک بین یک مایع و یک گاز به اصطلاح سطح آزاد نامیده می شود. در پدیده پاشش یک سیال مایع و

¹ Shannon

² Source Terms

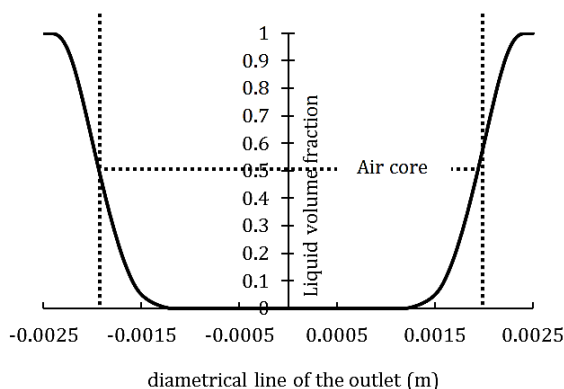


Fig. 4 Liquid volume fraction on diametrical line of the outlet

شکل 4 کسر حجمی سیال مایع روی خط قطری دهانه خروجی

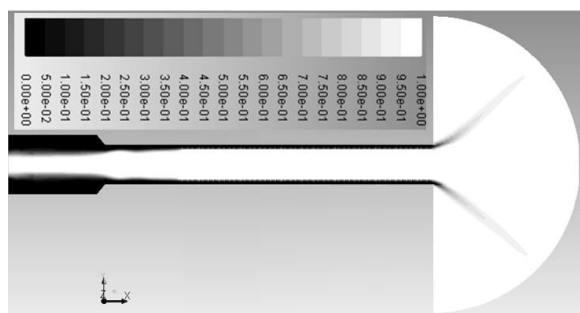


Fig. 5 Contours of volume fraction (liquid)

شکل 5 کانتور کسر حجمی سیال مایع

حفره هوا در میان نازل، لایه مایع چسبیده به دیواره‌های نازل و مخروط اسپری در خروجی، کاملاً مشهود است.

اثر شدت توربولانس جریان بر سایز قطرات تشکیل شده با انرژی جنبشی توربولانی نمایان می‌شود. مطالعات پیشین نشان داده‌اند شدت توربولانس جریان جت خروجی در تشکیل قطرات نقش دارد. این پارامتر می‌تواند سایز و توزیع سایز قطرات اسپری را تغییر قابل توجهی دهد. به عبارت دیگر، مقدار پارامتر توربولانس که معمولاً با انرژی جنبشی توربولانی جریان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، با تاریخچه جریان درون نازل مرتبط است. در "شکل 6" توزیع انرژی جنبشی توربولانی روی خط قطری دهانه نازل ارائه شده است. برای تخمین انرژی جنبشی توربولانی ورودی به حجم کنترل اسپری، این پارامتر در کل سطح سیال خروجی از نازل مد نظر قرار می‌گیرد. مقدار متوسط توزیع انرژی جنبشی توربولانی جریان در دهانه نازل در قدم بعدی شبیه‌سازی (در مدل MEP برای پیش‌بینی تابع چگالی احتمال حضور قطرات) استفاده می‌گردد به این صورت که محاسبه عبارت چشمه معادله انرژی براساس آن انجام می‌گیرد. مقدار میانگین انرژی جنبشی توربولانی براساس مقدار نرخ جریان جرمی عبوری از هر سطح کنترل (در دهانه خروجی نازل) و مقدار انرژی جنبشی توربولانی مربوط به آن محاسبه می‌شود.

5- ترکیب مدل ماکزیمم آنتروپی با زیر مدل جریان داخلی

هدف از ترکیب مدل‌ها افزایش دقت نتایج، کاهش وابستگی مدل به داده‌های تجربی تا حد امکان، و دخیل نمودن تأثیر بالادست جریان یعنی اثر هندسه نازل، شرایط جریان داخل نازل و مشخصه‌های ناپایداری امواج سطح بر مشخصه‌های پاشش می‌باشد. "شکل 7" فلوچارت ترکیب مدل‌ها را ارائه می‌دهد.

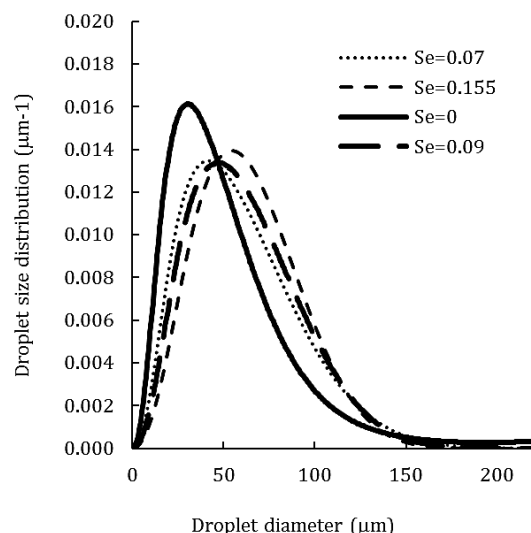


Fig. 2 Droplet size distribution in terms of energy source term

شکل 2 تغییرات توزیع سایز قطرات پاشش برحسب چشمه انرژی

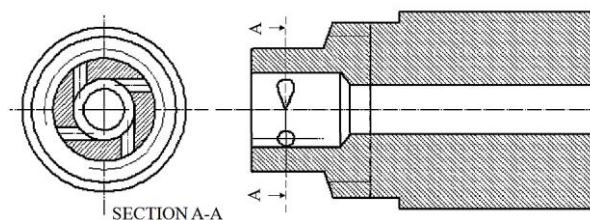


Fig. 3 Schematic of under-study injector

شکل 3 شماتیک انژکتور تحت مطالعه

پودر شدن آن، مرز بین جت مایع و هوا یک سطح آزاد است. بنابراین، باید از روش‌های عددی مخصوص بررسی سطح آزاد بین یک مایع و یک گاز استفاده کرد. از آن‌جا که در انژکتور مورد بررسی این تحقیق جریان دوفازی است، برای تحلیل آن نیاز به استفاده از یک مدل جریان دوفازی هست. این دو فاز سیال مایع و گاز (هوا) هستند. برای حل جریان دو فازی و یافتن سطح آزاد بین دو فاز از روش حجم سیال (VOF) استفاده شده است و به منظور مدل کردن آشفتگی از مدل $K-\epsilon$ استفاده شده است.

تحلیل برای هندسه با 850 هزار سلول محاسباتی در حوزه حل صورت گرفته است. شبکه لایه مرزی نیز با هفت لایه اعمال شده است. شرایط مرزی بدین صورت است که در مرز خروجی (محیط اطراف) اختلاف فشار در دو طرف آن صفر منظور شده است یعنی فشار نسبی صفر است. در ورودی‌ها (چهارراه ورودی) شرط مرزی فشار (3.5 بار نسبی) لحاظ شده است [1]. در دیواره‌ها شرط مرزی دیواره با شرط عدم لغزش به کار رفته است. تحلیل به صورت هم‌دما انجام شده است.

"شکل 4" نمودار کسر حجمی مایع روی خط قطری دهانه خروجی نازل را نشان می‌دهد. با استفاده از "شکل 4" ضخامت لایه مایع خروجی از نازل می‌تواند تخمین زده شود. به منظور تعیین مرز مشترک هوا-مایع، قرارداد می‌شود که سلول‌های با کسر حجمی مایع کمتر از 0.5 پر از هوا در نظر گرفته شوند و سلول‌های با کسر حجمی مایع بیشتر از 0.5 پر از مایع در نظر گرفته شوند. در این شکل، حد فاصل دو خط نقطه‌چین نشان‌دهنده بخش ستون هوا و خارج از آن مربوط به لایه سیال در دهانه نازل می‌باشد. در "شکل 5" نیز کانتور کسر حجمی سیال مایع نشان داده شده است. در این کانتور، ناحیه

جنبشی توربولانی را برابر با استهلاك در دیواره‌های نازل تخمین می‌زد. با توجه به نمودار "شکل 8" وقتی که عبارت چشمه انرژی در مدل ماکزیمم آنتروپی در نظر گرفته می‌شود، نتایج مدل با داده‌های تجربی بسیار خوب مطابقت دارند. همچنین اینکه توزیع حاصل از مدل تئوری بدون لحاظ نمودن عبارت چشمه انرژی، برای قطرات با سایز کوچکتر از 50 میکرون به طور قابل ملاحظه‌ای مقادیر بیشتری را در قیاس با داده‌های تجربی پیش‌بینی می‌کند و برای قطرات با سایز بزرگتر از 50 میکرون مقدار کمتری را در قیاس با داده‌های تجربی پیش‌بینی می‌کند. این نتیجه می‌تواند به علت وجود اثرات توربولانس در لایه سیال باشد که در پیش‌بینی مدل در نظر گرفته نشده است. اگر در مدل ماکزیمم آنتروپی، اثرات توربولانس درون جت در نظر گرفته نشود، بنابراین مدل برای قطرات کوچک پیش‌بینی فراوانی بیش از مقدار واقعی خواهد داشت. مطابق با آنچه که سلام [10] گزارش نموده است، ادی‌های توربولانی مقیاس بزرگ به جدا شدن تکه‌های سیال و تشکیل قطرات بزرگتر کمک می‌کنند. گردابه‌های توربولانی مقیاس بزرگ شامل انرژی کافی برای غلبه بر کشش سطحی و تولید انرژی سطحی موردنیاز برای تشکیل قطرات بزرگتر هستند. این دلیل می‌تواند عمده‌ترین دلیل برای معرفی یک مدل بهبود یافته به منظور لحاظ نمودن این اثر باشد. حتی برای قطرات با قطر بزرگتر از 50 میکرون، پیش‌بینی مدل تئوری با استفاده از زیرمدل قدیمی فراوانی سایز قطرات را بیش از مقدار واقعی (اندازه‌گیری شده از آزمون تجربی) پیش‌بینی می‌کند درحالی‌که پیش‌بینی مدل تئوری با استفاده از زیرمدل CFD تطابق بهتری با داده‌های تجربی برای کل طیف سایز قطرات دارد. مقادیر بزرگتر مشاهده شده برای این قسمت از توزیع، می‌تواند به علت مقدار بزرگ انرژی جنبشی توربولانی که با روش پیشنهادی هاو و گاسمن محاسبه شده است باشد که البته در روش معرفی شده در این رساله مقدار کمتری نسبت به آن تخمین زده شده است.

بنابراین می‌توان این نتیجه‌گیری را نمود که مدل ماکزیمم آنتروپی در ترکیب با زیرمدل دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند تخمین خوبی از توزیع سایز قطرات اولیه را به دست دهد. زیرا به کمک این زیر مدل، مقدار انرژی جنبشی ناشی از جریان متلاطم که در انمیزه شدن سیال نقش دارد با دقت بالاتری تخمین زده شده و اثر آن در مدل ماکزیمم آنتروپی لحاظ شده

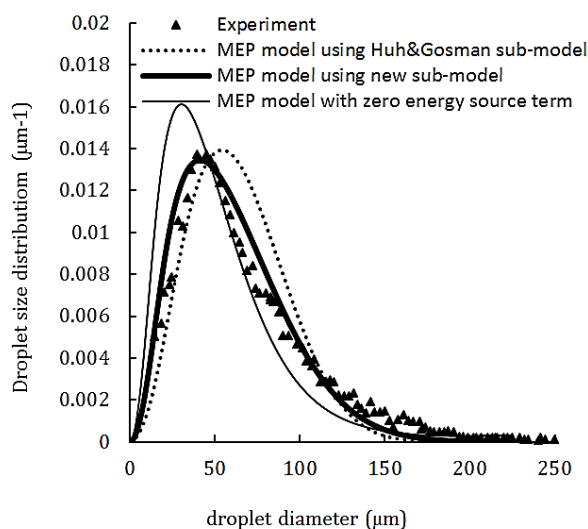


Fig. 8 Comparison of droplet size distribution obtained from MEP and experiment [9]

شکل 8 مقایسه توزیع سایز قطرات حاصل از مدل MEP و اندازه‌گیری تجربی [9]

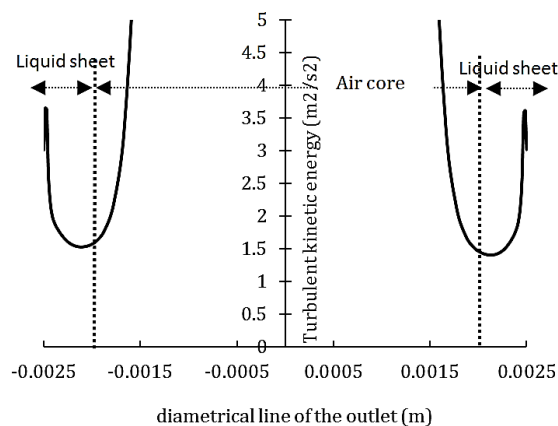


Fig. 6 Kinetic energy distribution on diametrical line of the outlet

شکل 6 توزیع انرژی جنبشی توربولانی روی خط قطری دهانه نازل

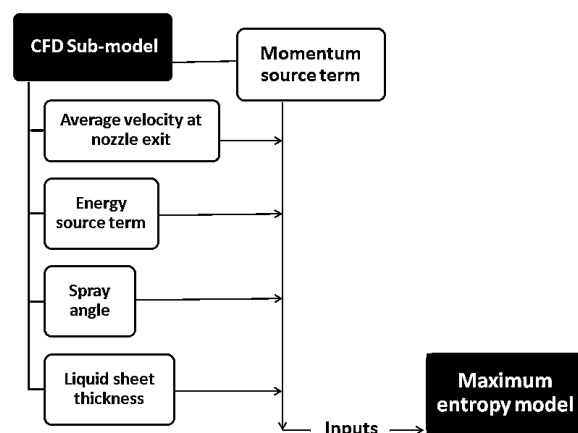


Fig. 7 models combination flow chart

شکل 7 فلوچارت ترکیب مدل‌ها

اعداد بدون بعد و عبارات چشمه محاسبه شده، در جدول 1 ارائه شده‌اند. سرعت میانگین سیال در خروجی نازل نیز به عنوان یک ورودی برای مدل ماکزیمم آنتروپی استفاده می‌گردد که آن هم از مدل CFD حاضر تامین شده است.

"شکل 8" توزیع‌های احتمال سایز قطرات که از مدل بدست آورده شده است و همچنین نتایج اندازه‌گیری تجربی را برای انژکتور صنعتی تحت مطالعه نشان می‌دهد. در این شکل، توزیع‌های سایز حاصل از مدل ماکزیمم آنتروپی با استفاده از زیرمدل قدیمی هاو و گاسمن، مدل ماکزیمم آنتروپی با استفاده از زیرمدل جدید (تحلیل جریان داخل انژکتور) و مدل ماکزیمم آنتروپی بدون لحاظ نمودن عبارت چشمه انرژی نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که نتایج مدل ماکزیمم آنتروپی با استفاده از زیر مدل CFD تطابق بهتری با نتایج تجربی موجود در منبع [9] نسبت به نتایج تحقیقات پیشین دارد. لازم به ذکر است که زیر مدل هاو و گاسمن مجموع انرژی

جدول 1 اعداد بدون بعد و عبارات چشمه محاسبه شده

Table 1 Non-dimensional numbers and calculated source terms

عبارت چشمه	عبارت چشمه	عدد	عدد ویر
بی‌بعد انرژی	بی‌بعد مومنتوم	رینولدز	
$\bar{S}_e$	$\bar{S}_{mu}$	Re	We _l
0.06	-0.0029	26000	932

d_{Drop}	قطر قطره (m)
D_i	قطر قطره i ام (m)
D_{30}	قطر میانگین جرمی (m)
$\dot{E}_O$	نرخ جریان انرژی
t	ضخامت لایه مایع (m)
H	ضریب شکل
$\dot{J}_O$	نرخ جریان مومنتوم
k	ثابت بولتزمن
L_b	طول شکست (m)
m_o	نرخ جریان جرمی
$\dot{n}$	تعداد کلی قطرات در واحد زمان
P_i	احتمال وقوع حالت i
Re	عدد رینولدز
S_m	چشمه جرم بی‌بعد
S_{mu}	چشمه مومنتوم بی‌بعد
S_e	چشمه انرژی
U_o	سرعت میانگین جت در خروجی نازل (ms^{-1})
U_g	سرعت میانگین گاز (ms^{-1})
U_m	سرعت میانگین قطرات (ms^{-1})
U_l	سرعت میانگین لایه مایع (ms^{-1})
u	سرعت قطره (ms^{-1})
V_m	حجم میانگین قطره
V_i	حجم قطره i ام (m^3)
σ	کشش سطحی (kg s^{-2})
λ_i	ضرایب لاگرانژ

است. این در حالیکه در مدل‌های پیشین چنین تخمینی از انرژی جنبشی توربولانی یا انجام نمی‌شده است و یا پیش‌بینی ضعیفی براساس مدل‌های یک بعدی انجام می‌گرفته است. همچنین نتایج نشان داده‌اند که حضور قطرات کوچک (کوچکتر از 75 میکرون) محتمل‌تر از قطرات بزرگتر است. احتمال حضور قطرات بزرگتر از 180 میکرون از مدل ماکزیمم آنتروپی با فراوانی صفر به دست می‌آید اما داده‌های تجربی احتمال حضور صفر را برای قطرات بزرگتر از 200 میکرون نشان می‌دهد. تفاوت نسبتاً کم بین پیش‌بینی این مدل ترکیبی و داده حاصل از اندازه‌گیری تجربی می‌تواند به علت خطای اندازه‌گیری تجربی و همچنین فرضیات به کار رفته در مدل تئوری باشد. در این بررسی به منظور بررسی اثر این زیر مدل بر روی پیش‌بینی مدل توزیع قطرات، دیگر ورودی‌های این مدل از نتایج تجربی تأمین شده است تا صرفاً اثر مدل CFD بررسی شده باشد.

6- نتیجه‌گیری

فرآیند اتمیزاسیون به منظور تخمین توزیع سایز قطرات در ناحیه شکست اولیه با استفاده از اصل ماکزیمم آنتروپی (MEP) در کنار معادلات بقاء مدل‌سازی شده است. به دلیل نواقصی که این مدل داشته است تلاش شده است تا حد امکان ورودی‌های این مدل را با اتصال زیرمدل مناسب به آن تأمین نمود. برای به دست آوردن پیش‌بینی بهتر از مدل توزیع قطرات ME، یک برآورد صحیح و دقیق از عبارات چشمه این مدل (یعنی تأثیر نیروهای آئروپنمیک در سراسر میدان جریان گاز به عنوان عبارت چشمه مومنتوم و انرژی جنبشی توربولانی به عنوان یک عبارت چشمه انرژی) بسیار ضروری است. این عبارات چشمه و سایر ورودی‌های مدل توزیع قطرات، به کمک زیرمدل‌های مناسب تأمین شده‌اند. به منظور درگیر نمودن اثرات توربولانس در مدل اتمیزاسیون، عبارت چشمه انرژی با استفاده از نتایج شبیه‌سازی جریان داخلی انژکتور تخمین زده شده است. جریان داخلی انژکتور با استفاده از تکنیک CFD براساس روش حجم سیال (VOF) مدل‌سازی شده است و مشخصات لایه مایع در دهانه خروجی انژکتور محاسبه شده است. از اهداف اصلی تحلیل جریان داخلی انژکتور، به دست آوردن تخمینی از انرژی جنبشی توربولانی در خروجی انژکتور به منظور تخمین عبارت چشمه انرژی است. مدل ME و زیر مدل CFD به وسیله عبارت چشمه انرژی و مومنتوم با یکدیگر پیوند داده شده‌اند. بنابراین مدل پیشنهادی، توانایی لحاظ نمودن اثرات مکانیزم‌هایی چون توربولانس و برهم‌کنش‌های آئروپنمیک که درون حجم کنترل اتفاق می‌افتند را به خوبی دارا می‌باشد. در واقع به کمک مدل حاضر، به نوعی اثرات بالادست جریان اسپری و هندسه انژکتور، در پایین دست اسپری در بدست آوردن توزیع قطرات در نظر گرفته شده است. در واقع، نوآوری مقاله حاضر، بهبود مدل ماکزیمم آنتروپی (MEP) برای به دست آوردن توزیع قطر و سرعت قطرات اسپری در ترکیب با زیرمدل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که برای اولین بار با دیدگاه تحقیق حاضر به منظور مرتبط کردن شرایط بالادست اسپری به پایین دست آن صورت گرفته است.

7- فهرست علائم

A_{cross}	سطح مقطع جت (m^2)
A	سطح تماس لایه مایع (m^2)
C_f	ضریب درگ
d_{Nozz}	قطر نازل (m)

8- مراجع

- [1] S.M. Hosseinalipour, H. Karimaei, prediction of air core and injection angle of a swirl injector using 3D analysis, *2nd proceeding of gas turbine*, Iran, Tehran, 2012. (in persian)
- [2] S. W. Park, C. S. Lee, Macroscopic structure and atomization characteristics of high-speed diesel spray, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 4, No. 4, pp. 157-164, 2003.
- [3] R.W. Sellens, T.A. Brzustowski, A prediction of the drop size distribution in a spray from first principles, *Atomization and Spray Technology*, Vol. 1, No.1, pp. 89-102, 1985.
- [4] X. Li, R.S. Tankin, Droplet size distribution: A Deviation of a Nukiyama-Tanasawa Type distribution function, *Combustion Science and Technology*, Vol. 56, pp. 65-76, 1987.
- [5] M. Ahmadi, R.W. Sellens, A simplified maximum-entropy-based drop size distribution, *Atomization and Sprays*, Vol. 3, pp. 291-310, 1993.
- [6] J., Yoon S.J. Cousin, C.v, Coupling of classical Linear Theory and Maximum Entropy Fomalism for Prediction of Drop Size Distribution in sprays, *Atomization and Sprays*, Vol. 6, pp. 601-22, 1996.
- [7] X. Li, R.S. Tankin, Derivation of droplet size distribution in sprays by using information theory, *Combustion Science and Technology*, Vol. 60, pp. 345-357, 1987.
- [8] L. Bayvel, z. Orzechowski, *liquid atomization*, Second Editition, pp. 85-90, Washington: Taylor&Francis, 1993.
- [9] E. Movahednejad, *prediction of droplet size and velocity distribution using MEF and breakup model*, Ph.D thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2010. (in persian)
- [10] K.A. Sallam, Z. Dai and G.M. Faeth, liquid breakup at the surface of turbulent round liquid jets in still gases, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 28, pp. 427-449, 2002.