



بررسی عددی اثر طول محفظه اختلاط بر جریان دوفازی درون اتمایزر گازدار و ضخامت فیلم مایع خارج شونده از آن

زهرا علیزاده کاکلر¹، محمدرضا انصاری^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 14115-116، mra_1330@modares.ac.ir

چکیده

اثر طول محفظه اختلاط بر جریان دوفازی درون اتمایزر گازدار و ضخامت فیلم مایع خارج شونده از اتمایزر در نسبت‌های دبی جرمی گاز به مایع 0.08%، 0.32% و 1.24% بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی جریان دوفازی درون اتمایزر به کمک مدل حجم سیال نشان دادند که طول محفظه اختلاط تأثیر چندانی بر رژیم جریان حاکم در مجرای تخلیه ندارد، اما با افزایش طول محفظه اختلاط، جریان دوفازی درون این محفظه به صورت توسعه‌یافته‌تری وارد مجرای تخلیه می‌شود؛ بنابراین ناپایداری‌های سطح مشترک دوفاز در مجرای تخلیه برای اتمایزر با محفظه اختلاط بلندتر کمتر است. همین‌طور براساس نتایج اندازه‌گیری ضخامت فیلم مایع خارج شونده از اتمایزر گازدار، تأثیر طول محفظه اختلاط بر ضخامت این فیلم بستگی به نسبت دبی جرمی گاز به مایع دارد. در نسبت دبی جرمی گاز به مایع پایین با افزایش طول محفظه اختلاط ضخامت فیلم مایع خارج شونده از اتمایزر گازدار حدود 7% افزایش داشته، در حالی که در نسبت دبی جرمی گاز به مایع بالا این ضخامت در حدود 35% کاهش را نشان می‌دهد. در نسبت دبی جرمی گاز به مایع میانی نیز با افزایش طول محفظه اختلاط این ضخامت در ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا کرده است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 21 بهمن 1396
پذیرش: 01 فروردین 1397
ارائه در سایت: 24 فروردین 1397
کلید واژگان:
اتمایزر گازدار
جریان دوفازی گاز-مایع
طول محفظه اختلاط
نسبت دبی جرمی گاز به مایع
ضخامت فیلم مایع

Numerical study of the effect of the mixing chamber length on the effervescent atomizer internal two-phase flow and the liquid film thickness at the exit the atomizer

Zahra Alizadeh Kaklar, Mohammad Reza Ansari*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

*Tehran, Iran, mra_1330@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 10 February 2018
Accepted 21 March 2018
Available Online 13 April 2018

Keywords:

Effervescent atomizer
Gas-Liquid two-phase flow
Mixing chamber length
Gas-to-Liquid mass ratio
Liquid film thickness

ABSTRACT

The effect of the mixing chamber length on the effervescent atomizer internal two-phase flow and the liquid film thickness at the exit of the atomizer at different gas-to-liquid mass ratios of 0.08%, 0.32%, and 1.24% has been investigated. The results of the internal two-phase flow simulation of the atomizer by the volume of fluid model showed that the mixing chamber length does not have much effect on the dominant flow regime in the discharge passage. However, by increasing the mixing chamber length, the two-phase flow inside this chamber more expanded before entering into the discharge passage. Therefore, the two-phase interface instabilities in the discharge passage are lower for the atomizer with the longer mixing chamber. In addition, based on the measuring results of the liquid film thickness at the exit of the atomizer, the effect of the mixing chamber length on the thickness of this film depends on the gas-to-liquid mass ratio. By increasing the mixing chamber length, at the low gas-to-liquid mass ratio, the liquid film thickness at the exit of the effervescent atomizer increases about 7%. While at the high gas-to-liquid mass ratio, it shows about 35% decrease. Also, at the middle gas-to-liquid mass ratio, by increasing the mixing chamber length this thickness increases at first and then decreases.

1- مقدمه

است. از این‌رو ابزارهای اسپری متعددی تحت عنوان اتمایزرها توسعه داده شده‌اند.

یکی از روش‌های اتمیزاسیون براساس اتمیزاسیون مایع هوادهی شده است که اتمیزاسیون گازدار¹ نامیده می‌شود. اتمیزاسیون گازدار یا اتمیزاسیون هوادهی شده که توسط لبقور و همکاران در دهه 1980 طراحی و توسعه پیدا

برخی از فرآیندهای صنعتی نیازمند انتشار مایع به صورت قطرات ریز یا اسپری در فضای گازی هستند. اسپری با توجه به توزیع سرعت و اندازه مطلوب قطره که خود وابسته به دبی‌های گاز و مایع است، کاربردهای گسترده‌ای دارد. از جمله این کاربردها احتراق [1]، صنایع شیمیایی [3،2]، نقاشی با اسپری [4] و داروهای مختلف، کشاورزی و خشک کردن با اسپری

¹ Effervescent Atomization

کرد در دسته روش‌های اتمیزاسیون اختلاط جریان دوفازی داخلی طبقه‌بندی می‌شود [5-7]. در مقایسه با دیگر اتمایزرهای دوسیالی، اتمایزر گازدار از تزریق گاز با سرعت پایین به درون مایع برای تشکیل جریان حبابی استفاده می‌کند؛ سپس مخلوط گاز-مایع به سمت روزنه خروجی حرکت می‌کند. حضور حباب‌ها درون جریان مایع فرآیند اتمیزاسیون را از طریق کاهش کسر مایع خارج‌شونده از روزنه خروجی و همین‌طور انبساط حباب‌ها در درون مایع پس از خارج شدن از روزنه افزایش می‌دهد. انبساط حباب‌ها به دلیل افت فشار ناگهانی سبب تشکیل رشته‌های¹ باریک مایع و قطرات کوچک می‌شود [8].

اتمایزرهای گازدار نسبت به اتمایزرهای معمول مزایایی دارند که از آن جمله اتمیزاسیون خیلی خوب در فشارهای خیلی پایین گاز، پایین بودن قابل ملاحظه دبی گاز در مقایسه با اتمایزرهای دوسیالی دیگر و کوچک‌تر بودن اندازه قطرات در فشار پاشش معین است [5،7]. همچنین قطر روزنه خروجی اتمایزرهای گازدار در مقایسه با سایر انواع اتمایزرها در دبی جریان مشابه بزرگ‌تر است [6،9]. روزنه خروجی بزرگ‌تر سبب کاهش مشکلات گرفتگی شده و بنابراین اتمیزاسیون مایع‌های ناخالص را ممکن می‌سازد. برای کاربردهای احتراقی، هوای درون سوخت مایع باعث افزایش راندمان احتراق و کاهش آلاینده‌هایی نظیر انتشار ناکس NOx می‌شود.

فرآیند اتمیزاسیون گازدار و در نتیجه مشخصه‌های اسپری حاصل بستگی به هندسه داخلی اتمایزر و GLR² دارد. جدل اسکای و همکاران [10] تأثیر پارامترهای هندسی داخلی مختلف و شرایط عملیاتی روی اندازه قطرات اسپری در یک اتمایزر از نوع هوادهی از بیرون به درون را به صورت تجربی مطالعه کردند. آن‌ها مشاهده کردند که در محفظه اختلاط با یک ردیف سوراخ هوادهی، افزایش طول نسبی ناحیه اختلاط (فاصله بین آخرین ردیف سوراخ‌های هوادهی و روزنه خروجی به قطر داخلی محفظه اختلاط) از 2.5 تا 4.6، اندازه قطرات کوچک‌تری را نتیجه می‌دهد. با افزایش تعداد ردیف‌های سوراخ‌های هوادهی این وابستگی کاهش پیدا می‌کند طوری که برای حالت پنج ردیف سوراخ هوادهی هیچ روند مشخصی را مشاهده نکردند. آن‌ها این‌گونه استدلال کردند که چون تعداد سوراخ‌های هوادهی بیشتر درون ناحیه اختلاطی باعث ایجاد جریان دوفازی با اختلاط به نسبت خوبی می‌شود؛ بنابراین ممکن است ناحیه اختلاط طولانی‌تر اثر قابل توجهی روی توسعه جریان دوفازی نداشته باشد. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده ناپایداری‌های بیشتر اسپری در ناحیه اختلاط طولانی‌تر بوده است.

مصطفی و همکاران [11] تأثیر هندسه داخلی و GLR اتمایزر گازدار را روی اندازه قطرات اسپری به صورت تجربی مطالعه کردند. ایشان در آزمایش‌های خود از اتمایزر گازدار با هوادهی از درون به بیرون استفاده کردند و دریافتند که اندازه قطرات با فاصله شعاعی از مرکز اسپری افزایش یافته و این روند با کاهش طول ناحیه اختلاطی افزایش می‌یابد. آن‌ها مشاهده کردند که اندازه قطرات دور از مرکز اسپری با افزایش طول ناحیه اختلاطی کاهش می‌یابد. با وجود این‌که در نزدیکی مرکز اسپری اندازه قطرات در طول‌های مختلف ناحیه اختلاطی تقریباً یکسان بود، ولی روند معکوسی مشاهده شد، یعنی با افزایش طول ناحیه اختلاطی اندازه قطرات کمی افزایش یافت.

لیو و همکاران [12،13] به صورت تجربی اثر پارامترهای هندسی مختلف را در یک اتمایزر گازدار از نوع هوادهی از بیرون به درون و تأثیر شرایط عملیاتی روی ناپایداری‌های اسپری و اندازه و سرعت قطرات مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که تأثیر طول ناحیه اختلاطی روی ناپایداری‌های

اسپری در GLR پایین ناچیز است، در حالی که در GLRهای بالاتر، ناحیه اختلاطی بلندتر ناپایداری اسپری به نسبت کمتری را نشان می‌دهد که مطابق با نتایج جدل اسکای و همکاران [14،15] نیست. آن‌ها استدلال کردند که این عدم تطابق می‌تواند به دلیل اختلاف در شرایط عملیاتی و طراحی سیستم باشد. همچنین آن‌ها با بررسی تأثیر دو طول مختلف از ناحیه اختلاطی در GLR مساوی 0.1 دریافتند که طول ناحیه اختلاطی کوتاه‌تر منجر به قطرات اسپری ریزتر با سرعت بیشتری می‌شود، ولی ناپایداری‌های اسپری بیشتری را در مرکز اسپری مشاهده کردند [12]. لیو و همکاران [13] آزمایش‌هایی را در GLR مساوی 0.15 انجام داده و دریافتند که طول ناحیه اختلاطی تقریباً تأثیر ناچیزی روی توزیع شعاعی اندازه و سرعت قطرات دارد؛ در حالی که در ناحیه مرکزی اسپری مشاهده کردند که طول ناحیه اختلاطی بلندتر اندازه قطرات بزرگ‌تر با سرعت کمتری را ایجاد می‌کند، اما مصطفی و همکاران [11] و جدل اسکای و همکاران [16] وابستگی شدید توزیع شعاعی اندازه و سرعت قطرات به طول ناحیه اختلاطی را نشان دادند و شر و همکاران [17] استدلال کردند که طول بهینه ناحیه اختلاطی برای اتمیزاسیون بستگی به GLR دارد.

حسن‌زاده جابه‌در و صدیقی [18] نیز اثر طول ناحیه اختلاطی روی رفتار جریان دوفازی درون ناحیه اختلاطی در اتمیزاسیون گازدار را بررسی کردند. آن‌ها نواحی اختلاطی به طول‌های 32، 52 و 72mm با قطر 9.6mm را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که نواحی اختلاطی بلندتر شانس به هم‌آمیختگی حباب‌ها را افزایش داده که باعث تشکیل حباب‌های بزرگ‌تر می‌شود، همچنین مشاهده کردند که نواحی اختلاطی بلند به غیریکخوانی در اندازه حباب به دلیل تصادفی بودن رخداد به هم‌آمیختگی کمک می‌کنند. نتایج نشان دادند که طول ناحیه اختلاطی کوتاه‌تر حباب‌های کوچک‌تر و یکنواخت‌تری را ایجاد می‌کند؛ بنابراین ناحیه اختلاطی کوتاه‌تر در GLRهای بالاتر از GLRهای مربوط به نواحی اختلاطی بلندتر اسپری پایداری را ایجاد می‌کند. مشاهده شد که وقتی جریان داخلی در رژیم حبابی است، در GLRهای پایین قطرات کوچکی توسط ناحیه اختلاطی کوتاه‌تر تولید می‌شود. سرعت قطره نرمال شده نیز برای ناحیه اختلاطی بلندتر تا حدی کمتر است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در بیشتر مطالعاتی که تاکنون انجام شده است از تأثیر طول ناحیه اختلاطی اتمایزر گازدار بر اندازه و سرعت قطرات اسپری حاصل بحث شده است. همین‌طور در اتمایزرهای گازدار از نوع هوادهی از درون به بیرون مطالعه شده، هوادهی از طریق چند ردیف سوراخ انجام شده است. این مسأله باعث می‌شود که همان‌طور که جدل اسکای و همکاران [10] نتیجه گرفته‌اند اثر تغییر طول ناحیه اختلاطی به دلیل به هم‌آمیختگی مناسب جریان دوفازی درون این ناحیه در تعداد سوراخ‌های هوادهی بیشتر کم رنگ‌تر شود. از آنجایی که ضخامت فیلم مایع خارج‌شونده از اتمایزر گازدار معیاری از اندازه قطرات اسپری حاصل است، هدف از مطالعه حاضر بررسی عددی اثر طول ناحیه اختلاطی بر جریان دوفازی درون اتمایزر گازدار و ضخامت فیلم مایع خارج‌شونده از روزنه خروجی اتمایزر در GLRهای مختلف است. به این منظور از شبیه‌سازی اتمایزر نوع V لین و همکاران [19] استفاده شده که از نوع هوادهی از درون به بیرون و از طریق یک سوراخ است. اثرات جاذبه و اغتشاش جریان و اثر تراکم‌پذیری گاز نیترون در GLR بالا در شبیه‌سازی حاضر لحاظ شده است.

2- هندسه و شرایط مرزی

در مقاله حاضر اتمایزر گازدار نوع V مورد آزمایش توسط لین و همکاران

¹ Ligament

² Gas-Liquid mass ratio

(4) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} \rho &= \alpha_l \rho_l + \alpha_g \rho_g \\ \mu &= \alpha_l \mu_l + \alpha_g \mu_g \end{aligned} \quad (4)$$

زیرنویس l مربوط به فاز مایع آب و زیرنویس g مربوط به فاز گازی نیتروژن است و $\alpha_l + \alpha_g = 1$.

محمود و مسعود [20] در شبیه‌سازی اتمایزر گازدار نوع V لین و همکاران [19] به کمک مدل دوفازی VOF، مدل‌های مختلف اغتشاشی k-ε را بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که نتایج به دست آمده از مدل‌های اغتشاشی مختلف تفاوت قابل توجهی باهم ندارند. در کار حاضر یک بار از مدل اغتشاشی k-ε استاندارد و بار دیگر با توجه به تراکم‌پذیر فرض کردن گاز نیتروژن در GLRهای بالا از مدل اغتشاشی SST k-ω برای مدل کردن لزجت اغتشاشی (μ_T) در معادله مومنتوم استفاده شده است. در این حالت نیز تفاوت محسوسی در نتایج کسر حجمی مشاهده نشد. مدل اغتشاشی SST k-ω برای شبیه‌سازی‌های بعدی انتخاب شد.

بردار نیروی کشش سطحی F_s به کمک نیروی سطحی پیوسته $(CSF)^2$ پیشنهاد شده توسط برکبیل و همکاران [21] به صورت رابطه (5) مدل شده است.

$$F_s = \sigma \kappa n \quad (5)$$

ضریب σ کشش سطحی و $\kappa = \nabla \cdot n / |n|$ شعاع انحنای سطح مشترک دوفاز و $n = \nabla \alpha_l$ بردار نرمال سطح مشترک است.

برای $GLR = 1.24\%$ ، با توجه به بالا بودن دبی گاز ورودی، اثر تراکم‌پذیری گاز نیتروژن نیز لحاظ شده است. در نتیجه در $GLR = 1.24\%$ فرض گاز ایده‌آل برای نیتروژن معادله انرژی نیز به معادلات حاکم به صورت رابطه (6) اضافه خواهد شد.

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [u(\rho E + p)] = \nabla \cdot [k_{eff} \nabla T] \quad (6)$$

که k_{eff} ضریب هدایت حرارتی مؤثر دو فاز است که به صورت رابطه (7) به دست می‌آید.

$$k_{eff} = \alpha_l k_{eff,l} + \alpha_g k_{eff,g} \quad (7)$$

مدل‌سازی جریان دوفازی تراکم‌ناپذیر (در $GLR = 0.08\%, 0.32\%$) و تراکم‌پذیر (در $GLR = 1.24\%$) درون اتمایزر گازدار با استفاده از روش صریح² مدل VOF نرم‌افزار ANSYS FLUENT انجام شده است.

حلگر فشارمینا با فرمول‌بندی گذرای ضمنی⁴ مرتبه اول به کار برده شده است. برای گسسته‌سازی ترم‌های جابه‌جایی⁵ معادلات مومنتوم، انرژی، انرژی جنبشی اغتشاشی و نرخ اتلاف اغتشاش از الگوی پیشرو⁶ مرتبه دوم استفاده شده است. برای معادله کسر حجمی نیز از الگوی بازسازی هندسه⁷ به دلیل تعقیب دقیق سطح مشترک استفاده شده است. الگوریتم PISO⁸ برای جفت‌شدگی فشار-سرعت به کار رفته است. باقی‌مانده حل برای معادله

جدول 1 دبی‌های جرمی ورودی آب و نیتروژن در GLRهای مختلف

Table 1 The inlet mass flow rates of the water and nitrogen at different gas-liquid mass ratios

GLR (%)	Water mass flow rate (g/s)	Nitrogen mass flow rate (mg/s)
0.08	6.33	5.06
0.32	6.33	20.26
1.24	6.33	78.49

² Continuum Surface Force

³ Explicit

⁴ Implicit

⁵ Convection

⁶ Upwind

⁷ Geo-reconstruct

⁸ Pressure Implicit with Splitting of Operator

[19] برای شبیه‌سازی انتخاب شده است. این اتمایزر شامل چهار بخش مجرای ورودی آب، مجرای ورودی گاز نیتروژن، محفظه اختلاط و مجرای تخلیه است. مجرای ورودی گاز نیتروژن در اتمایزر گازدار بررسی شده توسط لین و همکاران [19] لوله‌ای به قطر داخلی 0.76mm و قطر خارجی 1.59mm است. محفظه اختلاط دارای سطح مقطعی به ابعاد 6.4mm×2mm و زاویه همگرایی 50° است. مجرای تخلیه نیز سطح مقطع مربعی به ابعاد 2mm×2mm و طولی به اندازه 40mm دارد.

در شبیه‌سازی دوبعدی برای مستقل شدن هندسه از بعد سوم (Z) لازم است که مقطع دایروی لوله هوادهی با یک مستطیل معادل‌سازی شود که طول آن مساوی عمق اتمایزر یعنی 2mm است. در نتیجه هوادهی از طریق مجرای با مقطع مستطیلی به ابعاد 0.227mm×2mm انجام می‌گیرد که ضخامت آن در جهت x مساوی 0.383mm است. ابعاد و بخش‌های مختلف اتمایزر دوبعدی شده در شکل 1 نشان داده شده است.

آب و نیتروژن به ترتیب به عنوان فاز مایع و فاز گازی در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی ورودی شامل دبی‌های جرمی آب و نیتروژن و شرط فشار اتمسفریک به عنوان شرط مرزی خروجی است. کسر حجمی آب در ورودی آب برابر یک و در ورودی نیتروژن برابر صفر، در دیواره‌ها نیز شرط عدم لغزش برقرار است. جهت بررسی اثر طول محفظه اختلاط بر میدان جریان دوفازی داخلی اتمایزر گازدار و ضخامت فیلم مایع خارج‌شونده از آن از GLRهای 0.08%، 0.32% و 1.24% استفاده شده است. این مقادیر به ترتیب نماینده نسبت دبی جرمی گاز به مایع پایین، متوسط و بالا برای اتمایزر مورد نظر هستند. جدول 1 دبی‌های جرمی ورودی آب و نیتروژن را در GLRهای مختلف نشان می‌دهد.

در $GLR = 0.08\%, 0.32\%$ دو فاز به صورت هم‌دم در نظر گرفته شده‌اند، اما در $GLR = 1.24\%$ که نیتروژن به دلیل سرعت بالای آن به صورت گاز ایده‌آل فرض شده است، دمای ورودی آب و نیتروژن و خروجی اتمایزر حدود 300k و دیواره‌ها نیز عایق در نظر گرفته شده‌اند.

3- معادلات حاکم و روش حل عددی

معادلات ناویر-استوکس جفت شده با روش تعقیب VOF^1 در شبکه اویلری ثابت برای شبیه‌سازی عددی میدان جریان دوفازی در اتمایزر گازدار استفاده شده است. در روش VOF یک مجموعه واحد از معادلات مومنتوم توسط سیال‌ها به اشتراک گذاشته می‌شود. کسر حجمی هر سیال در هر سلول محاسباتی در سراسر دامنه دنبال می‌شود. در این روش کسر حجمی سیال اول برای سلول خالی با $\alpha = 0$ و برای سلول پر با $\alpha = 1$ تعیین می‌شود و هنگامی که شامل سطح مشترک بین سیال اول و دوم است $0 < \alpha < 1$ قرار می‌گیرد. معادلات واحد پیوستگی و ناویر-استوکس متوسط‌گیری شده رینولدز در سراسر دامنه به صورت روابط (2,1) حل می‌شوند.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \nabla \cdot [(\mu + \mu_T)(\nabla u + \nabla u^T)] + \rho g + F_s \quad (2)$$

برای دنبال کردن موقعیت سطح آزاد بین دو فاز با استفاده از مدل حجم سیال یک معادله جابه‌جایی اضافی به صورت رابطه (5) حل می‌شود.

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + u \cdot \nabla \alpha_l = 0 \quad (3)$$

α_l کسر حجمی آب مایع است. روابط (2,1) از طریق خواص چگالی و لزجت به کسر حجمی فازها مربوط می‌شود. خواص دو فاز با استفاده از روابط

¹ Volume of Fluid

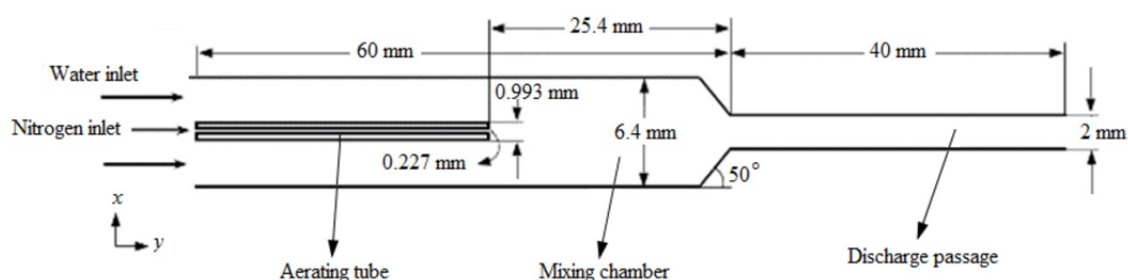


Fig. 1 Dimensions and various parts of the simulated atomizer

شکل 1 ابعاد و بخش‌های مختلف اتمایزر شبیه‌سازی شده

شده است.

همان‌طور که از جدول 2 نیز مشخص است، تأثیر طول محفظه اختلاط روی ضخامت فیلم مایع خارج شونده از اتمایزر گازدار وابسته به GLR است. با افزایش طول محفظه اختلاط در GLR پایین (0.08%)، ضخامت فیلم مایع خارج شونده از اتمایزر گازدار افزایش 6.49% داشته است در حالی که در GLR بالا (1.24%)، این ضخامت کاهش 34.6% را نشان می‌دهد. در GLR میانی (0.32%)، با افزایش طول محفظه اختلاط این ضخامت در ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا کرده است. برای تحلیل بهتر روند تغییر ضخامت فیلم مایع خارج شونده لازم است که جریان دوفازی درون اتمایزر در هر GLR برای طول‌های مختلف بررسی شود. به این منظور کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن درون اتمایزر گازدار و همین‌طور نمای نزدیک‌تر کانتورهای کسر حجمی و اندازه سرعت در مجرای تخلیه، مدت زمانی بعد از خروج کامل گاز نیتروژن از روزنه تخلیه برای سه طول مختلف محفظه اختلاط در GLRهای مختلف در شکل‌های 5-7 نشان داده شده است. پیش از این پیشرفت زمانی جریان دوفازی درون اتمایزر گازدار به طول ناحیه اختلاطی 25.4mm در GLRهای مختلف توسط علیزاده و انصاری [22] به کمک کانتورهای کسر حجمی نیتروژن ارائه شده است.

در GLR=0.08% جریان دوفازی درون محفظه اختلاط برای هر سه طول مختلف محفظه همان‌طور که از کانتورهای کسر حجمی داخل محفظه در شکل 5 مشخص است، به صورت جریان مایع با هسته پیوسته گازی است. با افزایش طول محفظه این هسته گازی بیشتر در مایع نفوذ کرده و مایع را وادار می‌کند که از بخش باریک‌تری نزدیک به دیواره عبور کند. اختلاف سرعت در سطح مشترک دو فاز درون محفظه اختلاط برای ایجاد ناپایداری کلون-هلمهولتز² در سطح مایع به دلیل سرعت پایین فاز گازی در این GLR کافی نیست، همچنین چون نیروی جاذبه نیز هم‌جهت با جریان است به هموار کردن ناپایداری‌ها (در صورت وجود) کمک خواهد کرد.

با ورود جریان دوفازی به مجرای تخلیه به دلیل کاهش سطح مقطع جریان و کاهش فشار، جریان دوفازی شتاب گرفته و با سرعت بیشتری وارد

پیوستگی 1e-4 و برای سایر معادلات 1e-6 است. در عدد کورانت¹ ثابت 0.2 مقادیر گام زمانی برای GLRهای مختلف بین 1e-8 تا 1e-6 متغیر است. برای محاسبه ضخامت فیلم مایع در مقطع دلخواه مجرای تخلیه از نصف میانگین طولی کسر حجمی آب در بازه زمانی مناسب (مدت زمانی بعد از خروج کامل نیتروژن از مجرای تخلیه) میانگین زمانی گرفته می‌شود. رابطه ریاضی تعیین ضخامت فیلم مایع به صورت رابطه (8) است.

$$b = \frac{1}{2(t_2 - t_1)} \sum_{j=1}^n \Delta t_j \left(\frac{\sum_{i=1}^m \alpha_i \Delta x_i}{2} \right) \quad (8)$$

که b ضخامت فیلم مایع در مقطع مورد نظر، n تعداد گام‌های زمانی در بازه زمانی t₁ تا t₂، m تعداد سلول‌ها در مقطع خروجی اتمایزر و α کسر حجمی آب در هر سلول است.

4- بررسی استقلال از شبکه و صحت سنجی نتایج

مطابق شکل 2 شبکه‌بندی اتمایزر گازدار به کمک شبکه ساختاریافته چهارضلعی انجام شده است. مبنای اعتبارسنجی نتایج ضخامت فیلم در خروجی اتمایزر است؛ بنابراین مقادیر کسر حجمی آب در مقطعی که 3mm بالاتر از روزنه تخلیه قرار دارد برای GLR=1.24% و برای تعداد شبکه‌های 20000، 40000، 80000 و 160000 مطابق شکل 3 رسم شد. همان‌طور که شکل 3 نشان می‌دهد نتایج حل در شبکه با تعداد سلول محاسباتی 80000 و 160000 تقریباً برهم منطبق هستند. شبکه با 80000 سلول محاسباتی به عنوان شبکه انتخاب شد.

ضخامت فیلم مایع در 3mm بالاتر از روزنه تخلیه برای GLRهای مختلف محاسبه و با نتایج حاصل از فرمول تجربی لین و همکاران [19] مقایسه شده است. شکل 4 نتایج حاصل از این صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار شکل 4 مشاهده می‌شود که نتایج شبیه‌سازی دوبعدی حاضر مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد که نشان‌دهنده کارآمدگی مدل‌های به کار رفته در شبیه‌سازی است.

5- ارائه و تحلیل نتایج

در این بخش نتایج حاصل از بررسی اثر طول ناحیه اختلاطی اتمایزر گازدار نوع V لین و همکاران [19] در دبی مایع 0.38L/min و نسبت GLRهای 0.08%، 0.32% و 1.24% بر ضخامت و سرعت فیلم مایع خارج شونده از اتمایزر گازدار ارائه می‌شود. بدین منظور سه طول ناحیه اختلاطی 12.7، 25.4 و 50.8mm که طول ناحیه اختلاطی 25.4mm مربوط به اتمایزر لین و همکاران [19] در نظر گرفته شده است. نتایج اندازه‌گیری ضخامت فیلم مایع برای سه طول محفظه اختلاط در GLRهای مختلف در جدول 2 خلاصه

جدول 2 ضخامت فیلم مایع خارج شونده از اتمایزر گازدار برای طول‌های مختلف محفظه اختلاط و در GLRهای مختلف (برحسب mm)

طول محفظه اختلاط (mm)	0.08	0.32	1.24
12.7	0.339	0.176	0.101
25.4	0.341	0.202	0.084
50.8	0.361	0.192	0.066

² Kelvin-Helmholtz instability

¹ Courant number

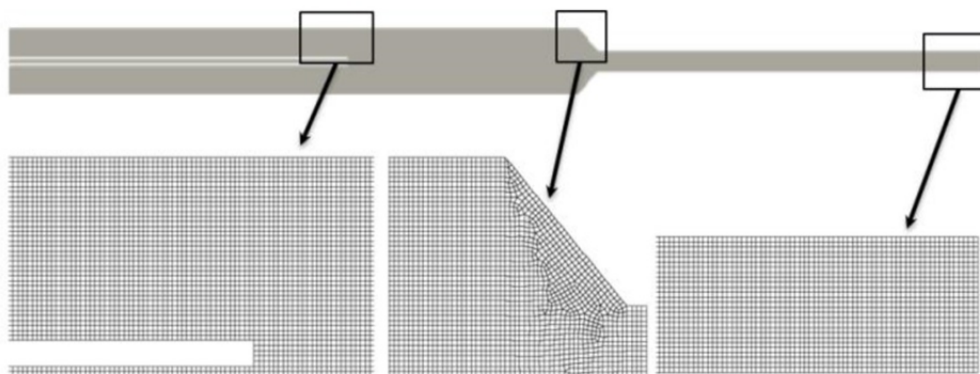


Fig. 2 Meshing strategy at different parts of the effervescent atomizer

ناپایداری‌های شدید و جریان کاملاً آشفتگی را ایجاد کند. در مجرای تخلیه با طول محفظه اختلاط کمتر چون جریان دوفازی درون محفظه اختلاط به اندازه کافی توسعه نیافته است جریان در ورود به مجرای تخلیه بیشتر ناپایدار می‌شود؛ بنابراین ناپایداری‌ها در طول بیشتری از مجرای تخلیه هموارتر می‌شوند. در برخی از بخش‌های جریان دوفازی درون مجرای تخلیه موج‌های ناپایدار موجود در سطح فیلم مایع تشکیل شده در نزدیک دیواره‌ها به هم رسیده و باعث ایجاد لخته¹ مایع می‌شوند. همان‌طور که در شکل 5 دیده می‌شود سرعت جریان دوفازی درون مجرای تخلیه برای هر سه حالت تقریباً مشابه بوده و با افزایش طول محفظه اختلاط نوسانات سرعت در نزدیکی سطح مشترک به خصوص در قسمت انتهایی مجرا کمتر شده و سرعت جریان بیشتر به سمت هسته گازی متمرکز می‌شود.

در حالت اتمایزر با بیشترین طول محفظه اختلاط نزدیک به خروجی نازل، جریان دوفازی به صورت جریان حلقوی به نسبت پایدار با هسته گازی باریکی است، در حالی که برای دو حالت دیگر هم‌چنان انبساطات هسته گازی به دلیل ناپایداری‌های سطح فیلم مایع وجود دارد. افزایش ضخامت فیلم مایع با افزایش طول محفظه اختلاط در GLR پایین نیز می‌تواند به دلیل همین رفتار جریان دوفازی درون مجرای تخلیه باشد. با افزایش GLR به 0.32% و در نتیجه افزایش دبی گاز در دبی ثابت مایع، اختلاف سرعت بین فازها در سطح مشترک دوفاز در درون محفظه اختلاط افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود، در ورود گاز نیتروژن از لوله هوادهی به جریان مایع در اتمایزر با طول محفظه اختلاط 25.4mm و 50.8mm، ناپایداری‌های کلون-هلمهولتز با دامنه‌های بلند تشکیل شده است. به سمت پایین دست محفظه اختلاط، طول موج این اغتشاشات افزایش یافته و در اثر تأثیر نیروی جاذبه به تدریج این ناپایداری‌ها هموارتر می‌شوند. این پدیده در اتمایزر با بیشترین طول محفظه اختلاط کاملاً روشن است و جریان در انتهای محفظه اختلاط به صورت جریان حلقوی به نسبت پایدار درمی‌آید.

هر چند که در اتمایزر با کمترین طول محفظه اختلاط اثری از ناپایداری‌های مشاهده شده در دو اتمایزر دیگر درون محفظه اختلاط دیده نمی‌شود، اما جریان گاز در این محفظه به صورت ضربانی عمل می‌کند، یعنی به صورت دوره‌ای محفظه در اثر فشار گاز نیتروژن وارد شده از لوله هوادهی تقریباً پر از نیتروژن شده و سپس حجم گازی شکل گرفته از لوله هوادهی کنده و به سمت مجرای خروجی هدایت می‌شود.

¹ Slug

شکل 2 روش شبکه‌بندی در قسمت‌های مختلف اتمایزر گازدار

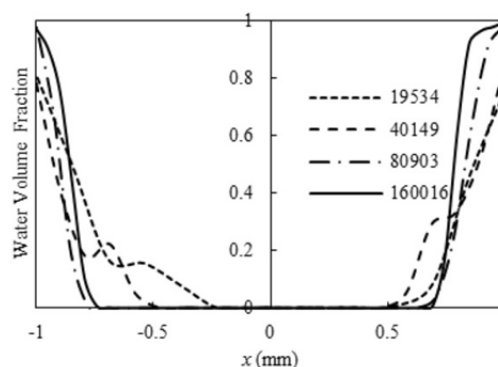


Fig. 3 Water volume fraction quantities at the 3 mm upstream of the discharge orifice for various number of grids at GLR=1.24%

شکل 3 مقادیر کسر حجمی آب در 3mm بالاتر از روزنه تخلیه در تعداد شبکه‌های مختلف برای GLR=1.24%

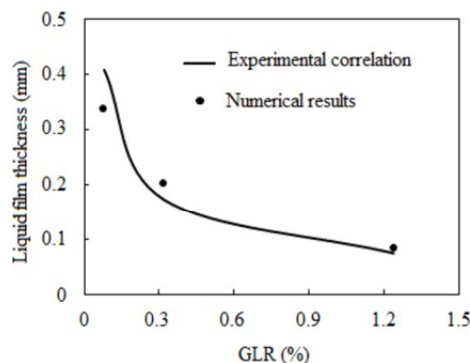


Fig. 4 The liquid film thickness of computed results in different aerating gas flow rates compare with measured thickness by Lin et al. [19]

شکل 4 ضخامت فیلم مایع به دست آمده در نسبت‌های هوادهی مختلف در مقایسه با ضخامت اندازه‌گیری شده توسط لین و همکاران [19]

مجرای تخلیه می‌شوند. افزایش سرعت و سرعت بیشتر فاز گازی نسبت به فیلم مایع در نمای نزدیک کانتورهای سرعت در شکل 5 کاملاً آشکار است. این افزایش سرعت باعث ایجاد ناپایداری‌هایی در ورودی مجرای تخلیه می‌شود که به سمت پایین دست مجرا طول موج ناپایداری‌ها افزایش می‌یابد. جریان دوفازی پیش از مجرای تخلیه پایدار است و همان‌طور که از کانتورهای کسر حجمی و سرعت در مجرای تخلیه مشخص است، افزایش سرعت گاز در ورود به مجرای تخلیه و در طول مجرا به گونه‌ای نیست که

6 و 7، نسبت به $GLR=0.32\%$ حدود سه برابر است؛ بنابراین ناپایداری‌های سطح فیلم مایع وارد شده از محفظه اختلاط به این مجرا افزایش می‌یابد. در اتمایزرها با طول محفظه اختلاط 12.7 و 25.4mm تعداد زیادی رشته مایع و قطرات حاصل از آن‌ها در جریان گازی مرکزی به دلیل سرعت بالای گاز نیتروژن وجود دارد. در اتمایزر با طول محفظه اختلاط 50.8mm تعداد کمتری از این رشته‌های مایع و قطرات مشاهده می‌شود. این مسأله می‌تواند به دلیل نازک‌تر بودن فیلم مایع واردشونده از محفظه اختلاط به مجرای تخلیه در این اتمایزر نسبت به دو اتمایزر دیگر باشد؛ بنابراین همان‌طور که از کانتورهای سرعت در مجرای تخلیه در شکل 7 دیده می‌شود سرعت جریان گاز در این اتمایزر کمتر است. ضخامت کمتر فیلم مایع و سرعت کمتر فاز گازی باعث می‌شود که ناپایداری سطح و در نتیجه رشته‌های مایع کمتری در مجرای تخلیه این اتمایزر ایجاد شود.

6- نتیجه‌گیری

تأثیر طول محفظه اختلاط بر جریان دوفازی داخل اتمایزر گازدار و ضخامت فیلم مایع خارج شونده از آن در نسبت‌های دبی جرمی گاز به مایع 0.08% ، 0.32% ، 1.24% و دبی مایع 0.38L/min و برای سه طول ناحیه اختلاطی 12.7، 25.4 و 50.8mm بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی به صورت کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن و اندازه سرعت ارائه شده‌اند. این کانتورها در GLRهای مختلف نشان دادند که افزایش طول محفظه اختلاط بر رژیم جریان دوفازی حاکم در درون محفظه اختلاط و مجرای تخلیه تأثیر چندانی ندارد، ولی بر ناپایداری‌های سطح دو فاز مؤثر است. با بلندتر شدن

با ورود جریان دوفازی به درون مجرای تخلیه به دلیل افزایش بیشتر سرعت فازها که با توجه به کانتورهای سرعت نسبت به حالت $GLR=0.08\%$ تقریباً سه برابر شده‌اند، جریان درون مجراهای تخلیه برای هر سه اتمایزر به صورت حلقوی و کاملاً ناپایدار است. در کانتورهای کسر حجمی مربوط به مجراهای تخلیه نشان داده شده در شکل 6 این ناپایداری‌ها به روشنی دیده می‌شوند. در این حالت ضخامت فیلم مایع وارد شونده از محفظه اختلاط به مجرای تخلیه در مقایسه با ابعاد مجرا زیاد است؛ بنابراین ناپایداری‌های سطحی ایجاد شده در مجرا طول موج و دامنه بلندی دارند. در اتمایزر با کوتاه‌ترین طول محفظه اختلاط گاهی رشته‌های مایع نیز در مجرای تخلیه مشاهده می‌شوند، در حالی که در دو اتمایزر دیگر چنین نیست.

با افزایش بیشتر GLR به مقدار 1.24% همان‌طور که در شکل 7 نشان داده شده است، بخش اعظمی از محفظه اختلاط در هر سه اتمایزر توسط گاز نیتروژن اشغال شده و مایع فقط به صورت فیلم نازک و مغشوشی در اطراف دیواره‌ها جریان دارد. درون محفظه اختلاط با طول‌های بلندتر در برخی قسمت‌ها به دلیل سرعت بالای گاز نیتروژن رشته‌های مایع از تاج موج‌های ناپایدار کنده می‌شوند. سپس این رشته‌ها در جریان گازی درون محفظه به قطرات فرو می‌پاشند؛ بنابراین مقداری از مایع به صورت قطرات در محیط گازی مرکزی جریان پیدا می‌کند. با افزایش طول محفظه اختلاط این رشته‌های مایع جدا شده و قطرات حاصل از آن‌ها بیشتر دیده می‌شوند. در ورود به مجرای تخلیه سرعت جریان دو فازی و به ویژه فاز گازی افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت با توجه به کانتورهای سرعت در شکل‌های



Fig. 5 Contours of Nitrogen volume fraction and velocity magnitude for three different mixing chamber lengths (12.7mm, 25.4mm and 50.8mm) inside the effervescent atomizer at $GLR=0.08\%$.

شکل 5 کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن و اندازه سرعت در سه طول مختلف محفظه اختلاط (12.7mm، 25.4mm و 50.8mm) درون اتمایزر گازدار در $GLR=0.08\%$

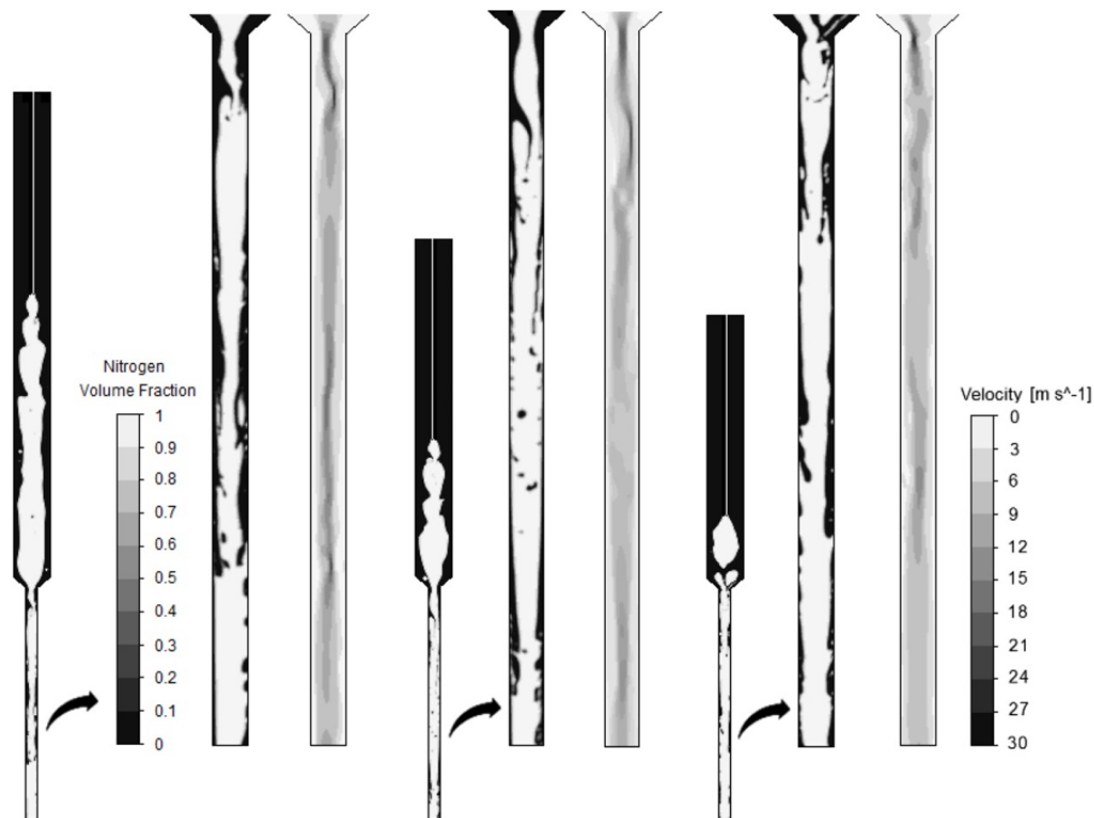


Fig. 6 Contours of Nitrogen volume fraction and velocity magnitude for three different mixing chamber lengths (12.7mm, 25.4mm and 50.8mm) inside the effervescent atomizer at GLR=0.32%

شکل 6 کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن و اندازه سرعت در سه طول مختلف محفظه اختلاط (12.7mm، 25.4mm و 50.8mm) درون اتمایزر گازدار در $GLR=0.32\%$

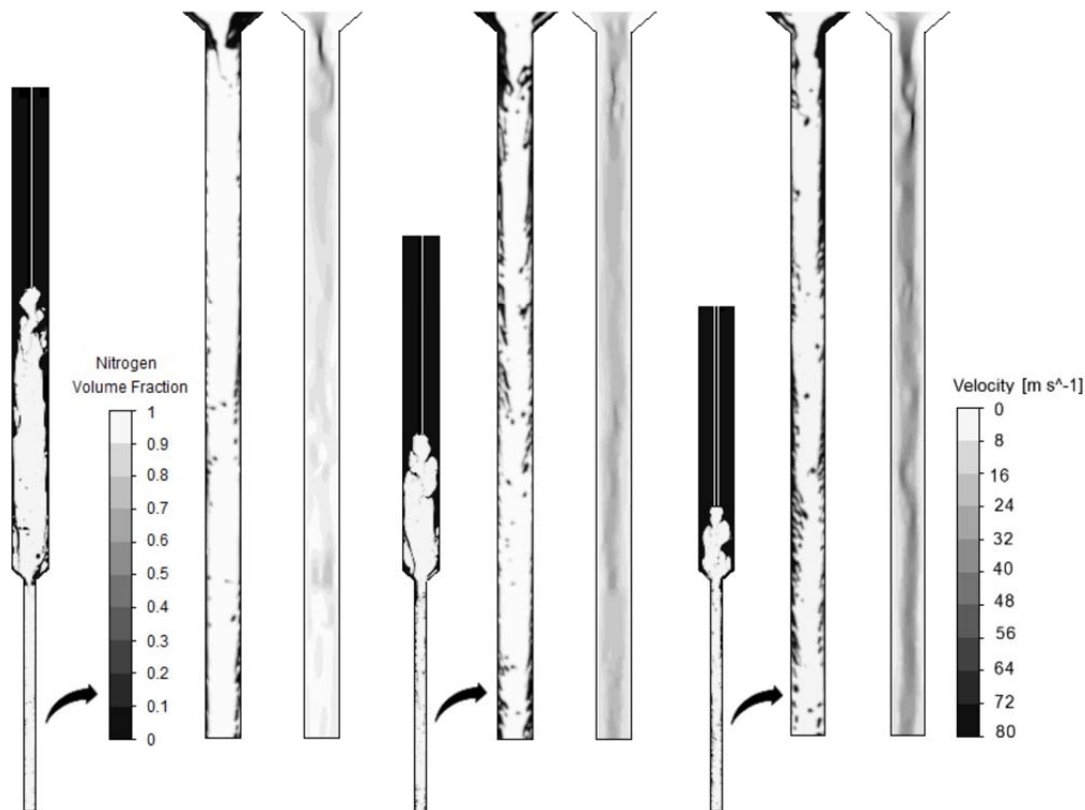


Fig. 7 Contours of Nitrogen volume fraction and velocity magnitude for three different mixing chamber lengths (12.7 mm, 25.4 mm and 50.8 mm) inside the effervescent atomizer at GLR=1.24%

شکل 7 کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن و اندازه سرعت در سه طول مختلف محفظه اختلاط (12.7mm، 25.4mm و 50.8mm) درون اتمایزر گازدار در $GLR=1.24\%$

- 1988.
- [7] T. C. Roesler, A. H. Lefebvre, Studies on aerated-liquid atomization, *Turbo & Jet-Engines*, Vol. 6, No. 3-4, pp. 221-230, 1989.
- [8] S. D. Sovani, P. E. Sojka, A. H. Lefebvre, Effervescent Atomization, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 27, No. 4, pp. 483-521, 2001.
- [9] M. E. Ferreira, J. J. G. Martins, J. C. F. Teixeira, Optimization of an effervescent atomizer to the combustion of residue Oils, *ASME Summer Heat Transfer Conference*, San Francisco, California, USA, July 17-22, pp. 751-757, 2005.
- [10] J. Jedelsky, M. Jicha, J. Slama, J. Otahal, Development of an effervescent atomizer for industrial burners, *Energy Fuels*, Vol. 23, No. 12, pp. 6112-6130, 2009.
- [11] A. Mostafa, M. Fouad, M. Enayet, S. Osman, Measurements of spray characteristics produced by effervescent atomizers, *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Fort Lauderdale, Florida, July 11-14, 2004.
- [12] M. Liu, Y. Duan, T. Zhang, Evaluation of effervescent atomizer internal design on the spray unsteadiness using a Phase/Doppler Particle analyzer, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 34, No. 6, pp. 657-665, 2010.
- [13] M. Liu, Y. Duan, T. Zhang, Y. Xu, Evaluation of unsteadiness in effervescent atomizer sprays by analysis of droplet arrival statistics-The influence fluids properties and atomizer internal design, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, No. 1, pp. 190-198, 2011.
- [14] J. Jedelsky, M. Jicha, J. Slama, J. Otahal, Influence of some geometrical parameters on the characteristics of effervescent atomization, *18th Annual Conference on Liquid Atomization & Spray Systems*, Zaragoza, Spain, Sep 9-11, 2002.
- [15] J. Jedelsky, Z. Beinstein, M. Jicha, Unsteadiness in effervescent sprays: influence of operational conditions and atomizer design, *11th Triennial International Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Vail, Colorado, USA, Jul 26-30, 2009.
- [16] J. Jedelsky, M. Landsmann, M. Jicha, I. Kuritka, Effervescent atomizer: influence of operation conditions and internal geometry on spray structure; study using PIV-PLIF, *22nd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Como Lake, Italy, Sep. 8-10, 2008.
- [17] E. Sher, M. Koren, D. Katoszewski, V. Kholmer, Energy consideration and experimental study of effervescent atomizers, *16th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ILASS-Europe*, Darmstadt, Germany, Sep 11-13, 2000.
- [18] M. Hassanzadeh Jobehdar, K. Siddiqui, *Experimental Study of Two-Phase Flow in a Liquid Cross-Flow and an Effervescent Atomizer*, PhD Thesis, University of Western Ontario, Canada, 2014.
- [19] K. C. Lin, P. J. Kennedy, T. A. Jackson, Structures of internal flow and the corresponding spray for aerated-liquid injectors, *37th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Salt Lake City, United States, July 8-11, 2001.
- [20] K. Mehmood, J. Masud, Analysis of two-phase flow in an effervescent atomizer using volume of fluid method, *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, January 0312, 2012.
- [21] J. U. Brackbill, D. B. Kothe, C. Zemach, Aconitum method for modeling surface tension, *Computational Physics*, Vol. 100, No. 2, pp. 335-354, 1992.
- [22] Z. Alizadeh Kaklar, M. R. Ansari, Numerical simulation of two-phase flow within an effervescent atomizer using volume of fluid model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 59-67, 2017. (in Persian)

محفظه اختلاط جریان دوفازی درون این محفظه بیشتر توسعه یافته و با ناپایداری‌های سطح کمتری وارد مجرای تخلیه می‌شود. این رفتار جریان دوفازی درون اتمایزر گازدار در GLRهای مختلف تأثیر متفاوتی بر ضخامت فیلم مایع خارج شونده از اتمایزر دارد.

نتایج اندازه‌گیری ضخامت فیلم مایع خارج‌شونده از اتمایزر گازدار در نسبت دبی جرمی گاز به مایع پایین نشان داد که افزایش طول محفظه اختلاط در ابتدا باعث افزایش ضخامت فیلم مایع خارج شونده از اتمایزر گازدار با شیب تند شده و سپس افزایش بیشتر طول ناحیه اختلاطی به صورت ناچیز باعث افزایش ضخامت فیلم مایع می‌شود. در حالی که در نسبت دبی جرمی گاز به مایع بالا عکس این حالت مشاهده می‌شود، یعنی با افزایش طول ناحیه اختلاطی در ابتدا ضخامت فیلم مایع خارج شونده از اتمایزر گازدار با شیب تند کاهش یافته و سپس با افزایش بیشتر طول ناحیه اختلاطی به صورت هموارتری کاهش پیدا می‌کند. در نسبت دبی جرمی گاز به مایع میانی ضخامت فیلم مایع با افزایش طول محفظه اختلاط رفتار ثابتی را نشان نمی‌دهد، یعنی در ابتدا با افزایش طول محفظه اختلاط این ضخامت افزایش و سپس کاهش می‌یابد. طبق شبیه‌سازی انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که طول بهینه ناحیه اختلاط برای اتمیزاسیون گازدار بستگی به GLR جریان دارد.

7- مراجع

- [1] C. Tricou, K. Knasiak, Development of a high transfer efficiency painting technology using effervescent atomization, *18th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Irvine, California, USA, May 22-25, 2005.
- [2] F. J. Petersen, O. Worts, T. Schaefer, P. E. Sojka, Effervescent atomization of aqueous polymer solutions and dispersion, *Pharmaceutical Development and Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 201-210, 2001.
- [3] F. J. Petersen, O. Worts, T. Schaefer, P. E. Sojka, Design and atomization properties for an inside-out type effervescent atomizer, *Drug Development and Industrial Pharmacy*, Vol. 30, No. 3, pp. 319-326, 2004.
- [4] S. H. Marshall, *Air Bubble Formation from an Orifice with Liquid Cross-Flow*, Ph.D. thesis, University of Sydney, Australia, 1990.
- [5] A. H. Lefebvre, X. F. Wang, C. A. Martin, Spray characteristics of aerated-liquid pressure atomizers, *ALAA Journal Propulsion and Power*, Vol. 4, No. 4, pp. 293-295, 1988.
- [6] A. H. Lefebvre, A novel method of atomization with potential gas turbine application, *Indian Defense Science Journal*, Vol. 38, No. 4, pp. 353-361,