مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1396، دوره 17، شماره 7، ص‌ص 59-67

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# شبیه‌سازی عددی جریان دوفازی داخلی اتمایزر گازدار به کمک مدل حجم سیال

زهرا علیزاده کاکلر[1]، محمدرضا انصاری[2*]

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

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

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

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 20 فروردین 1396
پذیرش: 02 خرداد 1396
ارائه در سایت: 16 تیر 1396

*کلید واژگان:*
اتمایزر گازدار
جریان دوفازی گاز- مایع
مدل حجم سیال
نسبت دبی جرمی گاز به مایع

**چکیده**

در تحقیق حاضر جریان دوفازی داخل اتمایزر گازدار، در نسبت‌های دبی جرمی گاز به مایع 0.08%، 0.32%، 1.24% و 4.9% و دبی مایع 0.38 L/min، به کمک مدل تعقیب سطح مشترک حجم سیال شبیه‌سازی شده است. هدف از این شبیه‌سازی بررسی رژیم‌های جریان دوفازی داخل اتمایزر گازدار و تأثیر آن بر کیفیت اتمیزاسیون و همین‌طور بررسی ناپایداری‌های سطح مشترک مایع- گاز در رژیم‌های مختلف جریان دوفازی داخل اتمایزر می‌باشد. با توجه به بالا بودن سرعت فاز گازی در دبی مایع ثابت و نسبت‌های دبی جرمی گاز به مایع بالا، اثر تراکم‌پذیری فاز گازی، که در مطالعات قبلی لحاظ نشده، در نسبت دبی جرمی گاز به مایع 1.24% و 4.9% در نظر گرفته شده است. همین‌طور در تمام شبیه‌سازی‌ها، اثر نیروی گرانشی لحاظ شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با افزایش دبی جرمی گاز به مایع، رژیم جریان دوفازی داخل مجرای تخلیه اتمایزر گازدار از رژیم جریان حبابی با حباب‌های کشیده به رژیم جریان حلقوی انتقال می‌یابد. همین‌طور با انتقال رژیم جریان از رژیم جریان حبابی به رژیم جریان حلقوی، ضمن کاهش ضخامت فیلم مایع خارج شونده از روزنه تخلیه، ناپایداری‌های سطح مایع در رژیم جریان حلقوی افزایش یافته و لیگامنت‌های جدا شده از سطح مایع کوتاه‌تر، باریک‌تر و ناپایدارتر می‌شوند. این نوع رژیم جریان برای اتمایزر گازدار بسیار مؤثر می‌باشد.

# Numerical simulation of two-phase flow within an effervescent atomizer using volume of fluid model

**Zahra Alizadeh Kaklar, MohamadReza Ansari***

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
* P.O.B. 14115-116 Tehran, Iran, mra_1330@modares.ac.ir

**ARTICLE INFORMATION**

Original Research Paper
Received 09 April 2017
Accepted 23 May 2017
Available Online 07 July 2017

*Keywords:*
Effervescent atomizer
Gas-Liquid two phase flow
Volume of Fluid model
Gas-to-Liquid mass ratio

**ABSTRACT**

In the present study two-phase flow within the effervescent atomizer has been simulated by the volume of fluid interface tracing model using 0.08%, 0.32%, 1.24%, and 4.9% gas-to-liquid mass ratios and 0.38 L/min liquid flow rate. The purpose of this simulation is to study two-phase flow regimes within the effervescent atomizer and their effect on the atomization quality. This study also considers the gas-liquid interface instabilities in different two-phase flow regimes inside the atomizer. The compressibility of gas phase, which is not considered in previous researches, is included in this study with the gas-to-liquid mass ratios of 1.24% and 4.9%, due to the high gas phase velocity in constant liquid flow rate and high gas-to-liquid mass ratios. The effect of gravitational force is considered in all simulations. The results of the simulation indicate that by increasing the gas-to-liquid mass ratio, the two-phase flow regime inside the discharge passage transfers from bubbly flow regime with long bubbles to annular flow regime. In addition to decreasing the liquid film thickness coming out from discharge orifice (during transform of the flow regime from bubbly flow to annular flow), the liquid interface instabilities increase in the annular flow regime and segregated ligaments from the liquid interface become shorter, thinner and more unstable. This type of regime is the most efficient flow behavior for the effervescent atomizer.

## 1- مقدمه

اتمیزاسیون مایع برای بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند موتورهای دیزل، موتورهای اشتعال جرقه‌ای، موتورهای توربین گاز، موتورهای موشک سوخت مایع، کوره‌های صنعتی، اسپری‌های کشاورزی و پوشش‌دهی سطح مواد به کمک اسپری، یک فرایند اساسی است. در کاربردهای احتراقی، اولین هدف اتمیزاسیون افزایش مساحت سطح ویژه سوخت مایع و در نتیجه دستیابی به نرخ بالای انتقال حرارت، تبخیر و اختلاط است. هم‌چنین کاهش اندازه قطرات سوخت منجر به انتشار کمتر آلاینده‌ها می‌شود [1]. در فرایند اتمیزاسیون مایع، برای غلبه بر نیروی کشش سطحی، به دلیل افزایش مساحت سطح، باید به مایع انرژی داده شود. انرژی ممکن است به وسیله اثرات فشاری، گریز از مرکزی، جنبشی یا صوتی تأمین شود. بر اساس شکل انرژی تأمین‌شده، اتمایزرها به فشاری، چرخشی- فشاری، دو سیالی، دوار، الکترواستاتیکی و فراصوتی دسته‌بندی می‌شوند [2]. روش‌های مکانیکی اتمیزاسیون اغلب براساس سرعت نسبی بین مایع و گاز است که یا مایع با

**Please cite this article using:**

**برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:**

Z. Alizadeh Kaklar, M. 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)

سرعت بالا به درون گاز با جریان نسبتاً آهسته تخلیه می‌شود، مانند اتمایزرهای فشاری و چرخشی، و یا مایع با حرکت نسبتاً آهسته در معرض جریان هوای سرعت بالا قرار می‌گیرد، که می‌توان به اتمایزرهای دو سیالی اشاره کرد [1]. اتمایزر دو سیالی، یعنی اتمایزرهای هوا- کمکی[1] و اتمایزرهای هوا- وزش[2]، از انرژی جنشی جریان گاز سرعت بالا برای فروپاشی ورقه یا جت مایع به قطرات استفاده می‌کنند. بسیاری از اتمایزرهای هوا- کمکی و هوا- وزش از نوع اختلاط خارجی هستند که در آن‌ها حجم مایع قبل از اینکه در معرض گاز اتمیزه‌کننده سرعت بالا قرار بگیرد در ابتدا تبدیل به جت یا ورقه می‌شود. در اتمایزرهای اختلاط داخلی، برخورد بین گاز اتمیزه کننده سرعت بالا و مایع درون بدنه اتمایزر واقع می‌شود [1].

اتمایزرهای دوسیالی اختلاط داخلی به دلیل کیفیت اتمیزاسیون بالا، مصرف کمتر هوای فشرده و یکنواختی مطلوب در فرایند پودرسازی، کاربردهای گسترده‌ای از جمله در توربین‌های گازی صنعتی و بویلرها دارند [3]. اتمایزر گازدار[3] در دسته اتمایزرهای دوسیالی اختلاط داخلی قرار می‌گیرد که بر خلاف سایر انواع اتمایزرهای دوسیالی، گاز اتمیزه‌کننده برای تشکیل مخلوط دوفازی حبابی در بالادست روزنه تخلیه با سرعت بسیار پایین به درون مایع تزریق می‌شود. به دلیل چگالی نسبتاً پایین گاز، بخش قابل توجهی از کل مساحت مقطع عرضی جریان را گاز اشغال می‌کند. این پدیده، به دلیل کاهش ابعاد مایع مشخصه در روزنه تخلیه، باعث بهبود اتمیزاسیون می‌شود [4]. اتمایزرهای گازدار به دلیل مزایایی از قبیل، ریزتر بودن اندازه قطرات نسبت به بیشتر روش‌های اتمیزاسیون متداول در یک فشار پاشش معین، کمتر بودن دبی جریان گاز موردنیاز نسبت به بیشتر روش‌های اتمیزاسیون دوسیالی دیگر، اجازه بزرگتر بودن اندازه روزنه خروجی نسبت به سایر انواع اتمایزرها و در نتیجه کاهش مشکلات مربوط به گرفتگی نازل و ساخت آسان‌تر آن، در چند دهه اخیر مورد توجه خاص قرار گرفته‌اند. در این نوع اتمایزرها، جریان دوفازی گاز-مایع درون اتمایزر نقش مهمی در تعیین عملکرد آن دارد. با این وجود درک فعلی از جریان داخلی اتمایزر گازدار نسبتاً محدود است [5].

مطالعات آزمایشگاهی زیادی روی تأثیر الگوی جریان داخلی بر مشخصه‌های اسپری خارجی اتمایزر گازدار صورت گرفته است. ویتلو و لوفور [6]، با تغییر نسبت هوا به مایع (ALR[4])، سه رژیم جریان مختلف (حبابی، حلقوی، اسلاگ یا انتقالی) درون محفظه اختلاط[5] مشاهده کردند. سانتانگلو و سایکا [7] ساختار نزدیک به نازل اسپری گازدار را بررسی و بیان کردند که مایع، یا از طریق فرایند انبساط حباب (برای رژیم جریان حبابی)، یا از طریق تشکیل حالت درختی (برای رژیم جریان حلقوی) فرومی‌پاشد. چین و لوفور [8] نیز رژیم‌های مختلف درون اتمایزر دو سیالی اختلاط داخلی و ارتباط آن با اتمیزاسیون جریان دوفازی خارج شده را بررسی کردند. آن‌ها در آزمایشاتشان اثر تغییر خواص مایع، ابعاد مجرا و شرایط جریان را روی رژیم‌های جریان هم در محفظه اختلاط و هم در روزنه نهایی تخلیه اتمایزر مطالعه کردند. کیم و لی [9]، اثر الگوهای جریان درون محفظه اختلاط را روی عملکرد اتمایزرهای گازدار با روزنه بزرگتر از 1.2 mm و برای فشار پاشش کمتر از 4 bar به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها سه رژیم جریان حبابی، حلقوی و انتقالی را در محفظه اختلاط شناسایی و مشاهده کردند که در رژیم جریان حبابی فرایند انبساط حباب و شکست لیگامنت[6] باعث فروپاشی مخلوط هوا/ مایع، و در رژیم جریان حلقوی برهم‌کنش آیرودینامیکی به دلیل سرعت نسبی بالا بین هسته گازی و فیلم مایع باعث فروپاشی حلقه مایع به قطرات ریز می‌شود. در این مطالعه، هم‌چنین با استفاده از مدل‌های جریان دوفازی معیاری برای انتقال الگوی جریان داخلی ارائه شده است. سرکار و رامامورتی [10] با بررسی ساختارهای اسپری مربوط به رژیم‌های جریانی مختلف درون اتمایزر گازدار، مشاهده کردند که در رژیم جریان حبابی فروپاشی حباب‌های گازی در لبه مخروط اسپری و در رژیم جریان اسلاگ انبساط حباب‌های مرکزی باعث اتمیزاسیون می‌شوند. آن‌ها برای رژیم جریان حلقوی مشاهده کردند که ساختار اسپری کاملاً از رژیم‌های جریان حبابی و اسلاگ متنفاوت است و مایع به صورت ورقه مخروطی توخالی بیرون می‌آید. لین و همکاران [11]، آزمایشات مفصلی را روی ساختارهای جریان دوفازی درون انژکتور گازدار و اسپری‌های مربوطه در میزان هوادهی‌های مختلف انجام دادند. آن‌ها در آزمایشاتشان از پنج نوع مجرای هوادهی مختلف برای تولید رژیم‌های مخلوط دوفازی متفاوت استفاده کردند. ترکیب‌های متفاوتی از زاویه همگرایی و نسبت طول به قطر (L/D) آزمایش شدند. ضخامت فیلم مایع در مجرای تخلیه برای GLR[7]ها و دبی‌های مایع مختلف اندازه‌گیری شد. مشاهده شد که ساختار جریان دوفازی داخل مجرای تخلیه تأثیر زیادی روی اسپری حاصل دارد.

جریان دوفازی داخلی در اتمیزاسیون گازدار باعث افزایش ناپایداری‌های اسپری می‌شود. در این زمینه نیز مطالعات تجربی گسترده‌ای انجام شده است که از آن میان لانگ و سایکا [12]، علت ناپایداری‌ها در رژیم جریان حبابی را ناشی از انبساط شبه متناوب حباب‌ها و شکست اسلاگ مایع بین حباب‌ها دانسته‌اند. ویتلو و لوفور [6] با بررسی الگوی جریان دوفازی در محدوده وسیع GLR (0.005-0.6) مشاهده کردند که جریان بیرونی ناپایدار فقط در رژیم انتقالی جریان‌های دوفازی یافت می‌شود. جدل‌اسکای و جیچا [13]، آزمایشاتی با محدوده GLR بالا (تا 0.8) انجام دادند و اظهار داشتند که اگر GLR به مقدار 0.06 یا کمتر کاهش یابد، هنگامی که جریان دوفازی داخلی از جریان حلقوی به جریان حبابی کفی منتقل می‌شود، ناپایداری‌های اسپری ظاهر می‌شوند. گجل و همکاران [14] نیز توزیع جرمی مایع در اسپری‌های گازدار را با استفاده از سیال‌های عامل آب و هوا به صورت تجربی مطالعه کردند. آن‌ها مشاهده کردند که با تغییر رژیم جریان از جریان حبابی به جریان حلقوی، الگوی توزیع جرم از حالت توده‌های مایع متراکم و به صورت ضعیف اتمیزه شده به حالت قطرات ریز با توزیع یکنواخت در می‌آیند. بنابراین آن‌ها نتیجه گرفتند که درجه ناپایداری‌ها به تدریج با افزایش دبی گاز کاهش می‌یابد.

تعداد مطالعات انجام شده روی شبیه‌سازی جریان داخلی اتمایزر گازدار انگشت شمار است. از این میان، تیان و همکاران [15] ساختار جریان داخلی یک انژکتور مایع هوادهی شده را با استفاده از مدل مخلوط[8] دوفازی برای GLRهای 0.08% و 2.45% به صورت دو بعدی و سه بعدی شبیه‌سازی کرده‌اند. هندسه اتمایزر مورد بررسی آن‌ها منطبق با اتمایزر نوع V مورد آزمایش توسط لین و همکاران [11] بوده است. نتایج دوبعدی آن‌ها برای GLR=0.08%، همانند نتایج تجربی، نشان‌دهنده ترکیب جریان دوفازی اسلاگ و حلقوی در اتمایزر گازدار بوده است. همین‌طور نتایج دوبعدی و سه-

[1] Air-assist
[2] Air-blast
[3] Effervescent atomizer
[4] Air Liquid Ratio
[5] Mixing chamber
[6] Ligament
[7] Gas Liquid Ratio
[8] Mixture

بعدی آن‌ها نیز مطابق نتایج تجربی نشان دادند که مد جریان حلقوی برای GLR=2.45% غالب است. اسفرجانی و دولت‌آبادی [16]، با استفاده از روش نشان‌گر و سلول چند سیالی (MFMAC)[1]، ساختار سه بعدی جریان دوفازی درون یک انژکتور مایع هوادهی شده را مدل‌سازی کردند. آن‌ها رفتار فیلم مایع حاوی نانوذرات در مجرای تخلیه را برای GLRهای بین 0.08%-1.25% مورد بررسی قرار دادند. حضور ذرات جامد با اندازه نانو در سوسپانسیون بر حسب چگالی و لزجت متغیر توده مایع بیان شده است. هندسه اتمایزر مورد مطالعه در این کار نیز مانند اتمایزر نوع V لین و همکاران [11] بوده با این تفاوت که برای ساده‌سازی هندسه فرض شده است که سطح مقطع روزنه هوادهی مربع است. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش میزان هوادهی، اختلاط بین گاز و مایع افزایش می‌یابد و ساختار جریان در نزدیکی خروجی نازل از جریان اسلاگ به جریان حلقوی تغییر می‌یابد و اسپری پایدارتری نسبت به حالت با GLRهای پایین تشکیل می‌شود. همین‌طور نتایج آن‌ها نشان داد که غلظت نانو ذرات، وقتی که در محدوده سیال نیوتنی تغییر می‌کنند، هیچ تأثیر قابل توجهی روی ضخامت فیلم مایع ندارد. محمود و مسعود [17] جزییات جریان دوفازی داخل اتمایزر گازدار را به کمک روش حجم سیال (VOF[2]) بدست آوردند. برای مقایسه مطلوب روش VOF و MFMAC، آن‌ها هندسه و اندازه مش و دیگر جزییات کار خود را شبیه به کار اسفرجانی و دولت‌آبادی [16] انتخاب کردند ولی به منظور بدست آوردن پدیده جریان واقعی، برخلاف کار اسفرجانی و دولت‌آبادی [16] که نصف ناحیه را مدلسازی کرده بودند، از مدل کامل سه بعدی استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها با نتایج منتشر شده قبلی تطابق نزدیکی داشتند به علاوه اینکه اثر GLR روی ضخامت فیلم مایع مشخصه در روزنه تخلیه، اثر مشخصات هندسی و برهم‌کنش گاز- مایع در GLRهای مختلف نیز ارزیابی شده است.

کسیدی و همکاران [18] شبیه‌سازی سه بعدی جریان دوفازی درون انژکتور مایع هوادهی شده برای GLRهای مختلف را به کمک مدل مخلوط دوفازی انجام دادند. آن‌ها از دو روش گسسته‌سازی، یکی بر اساس الگوی رایج تسخیر شوک[3] با روش کاهش تغییرات کل (TVD[4]) و دیگری روش تسخیر دقیق سطح مشترک[5] استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان دهنده اثرات اصلاح مش، الگوی گسسته‌سازی و مدل توربولانسی در حل‌های پیش‌بینی شده است. انژکتور مورد استفاده در این مطالعه از نوع بیرون به درون بوده و هوادهی از طریق سوراخ‌های موجود در مجرای تخلیه صورت گرفته است. هلمی و همکاران [19] نیز از روش VOF برای شبیه‌سازی میدان جریان داخلی اتمایزر گازدار نوع V لین و همکاران [9]، در GLRهای کمتر از 0.8% و برای سوخت هواپیمایی Je-A1 استفاده کردند. ضمن اینکه نتایج شبیه‌سازی آن‌ها مطابقت خوبی با نتایج تجربی داشته است، نشان‌دهنده سه رژیم جریانی اسلاگ، اسلاگ- حلقوی و حلقوی در مجرای تخلیه به ازای میزان هوادهی‌های مختلف بوده است.

در مطالعه حاضر، هدف شبیه‌سازی عددی دوبعدی میدان جریان داخلی اتمایزر گازدار نوع V مطالعه شده توسط لین و همکاران [11] به کمک روش VOF و برای GLRهای مختلف است. در مطالعات عددی که تاکنون روی این نوع اتمایزر انجام شده است، در GLRهای بالا که دبی جرمی و در نتیجه سرعت فاز گازی بالا است، اثر تراکم‌پذیری فاز گازی در نظر گرفته نشده است. همین‌طور، در بیشتر شبیه‌سازی‌های انجام شده، به منظور کاهش حجم محاسبات، مجراهای ورودی فاز مایع و فاز گاز در میدان حل وارد نشده‌اند. در این مطالعه ضمن شبیه‌سازی هندسه کامل اتمایزر گازدار و در نظر گرفتن اثر نیروی گرانشی در تمامی GLRهای بررسی شده، اثر تراکم‌پذیری فاز گازی در GLRهای بالا نیز لحاظ شده است. نتایج شبیه‌سازی حاضر به صورت کانتورهای کسر حجمی و سرعت ارائه شده و همچنین ضخامت فیلم مایع خارج شونده از اتمایزر گازدار در میزان هوادهی‌های مختلف نیز محاسبه و با نتایج تجربی مقایسه شده است.

## 2- هندسه و معادلات حاکم

اتمایزر گازدار مورد بررسی در این مقاله منطبق بر اتمایزر نوع V مورد آزمایش توسط لین و همکاران [11] است. همان‌طور که از شکل 1 مشخص است، اتمایزر گازدار بررسی شده شامل چهار بخش: مجرای ورودی آب، مجرای ورودی گاز نیتروژن، محفظه اختلاط و مجرای تخلیه است. در اتمایزر گازدار بررسی شده توسط لین و همکاران [11]، مجرای ورودی گاز نیتروژن لوله‌ای به قطر داخلی 0.76 mm و قطر خارجی 1.59 mm، محفظه اختلاط با ابعاد سطح مقطع 6.4 mm×2 mm و زاویه همگرایی 50° و مجرای تخلیه با سطح مقطع مربعی 2 mm×2 mm و طول 40 mm در نظر گرفته شده است. در کار حاضر، به دلیل دوبعدی بودن شبیه‌سازی، لوله هوادهی اتمایزر با یک کانال به ابعاد سطح مقطع 0.227 mm×2 mm و ضخامت 0.496 mm معادلسازی شده است. سایر ابعاد اتمایزر نیز در شکل 1 نشان داده شده است. سیال‌های مورد مطالعه، آب و نیتروژن به ترتیب به عنوان فاز مایع و فاز گازی هستند. شرایط مرزی شامل دبی‌های جرمی آب و نیتروژن به عنوان شرط مرزی ورودی، شرط عدم لغزش در دیواره‌ها و شرط فشار اتمسفریک به عنوان شرط مرزی خروجی است.

شبیه‌سازی با دبی مایع 0.38 L/min و نسبت GLRهای 0.08%، 0.32%، 1.24% و 4.9%، منطبق بر GLRهای بررسی شده توسط لین و همکاران، و به کمک نرم‌افزار انسیس فلوئنت انجام شده است.

برای شبیه‌سازی عددی میدان جریان دوفازی در اتمایزر گازدار از معادلات ناویر- استوکس کوپل شده با روش تعقیب VOF در شبکه اویلری ثابت استفاده شده است. در مدل VOF، یک مجموعه واحد از معادلات مومنتوم توسط سیال‌ها به اشتراک گذاشته می‌شود و 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 متوسط گیری شده رینولدز در سراسر دامنه با روابط (2,1) حل می‌شوند:

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

$$\frac{\partial(\rho \mathrm{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathrm{uu}) = -\nabla p + \nabla \cdot [(\mu + \mu_T)(\nabla \mathrm{u} + \nabla \mathrm{u}^{\mathrm{T}})] + \rho \mathrm{g} + \mathrm{F}_s \tag{2}$$

پس از بررسی مدل‌های توربولانسی مختلف و با توجه به تراکم‌پذیر فرض کردن گاز نیتروژن در GLRهای بالا، مدل توربولانسی k-ω SST برای مدل کردن لزجت توربولانسی ($\mu_T$) در معادله مومنتم، انتخاب شد.

مدل حجم سیال برای دنبال کردن موقعیت سطح آزاد بین دو فاز مخلوط نشدنی از یک معادله جابجایی اضافی به صورت رابطه (3) استفاده می‌کند:

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \mathrm{u} \cdot \nabla \alpha_i = 0 \qquad i = 1,2 \tag{3}$$

[1] Multi-Fluid Marker and Cell
[2] Volume of Fluid
[3] Shock-capturing
[4] Total Variation Diminishing
[5] Sharp-interface capturing

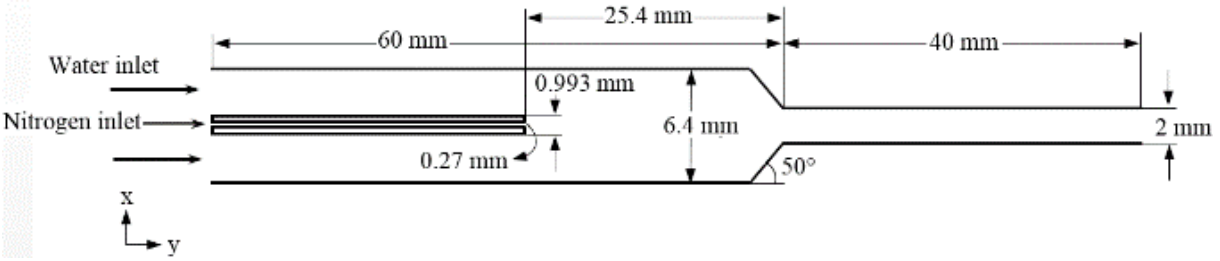


**Fig. 1** Dimensions of the simulated atomizer

**شکل 1** ابعاد اتمایزر شبیه‌سازی شده

که $i$=1 مربوط به فاز مایع و $i$=2 مربوط به فاز گاز است. معادله 3 از طریق خواص چگالی و لزجت به کسر حجمی فازها مربوط می‌شود. خواص سیال-های اول و دوم با استفاده از روابط (4) محاسبه می‌شود:

$$\rho = \sum_{i=1}^{2} \alpha_i \rho_i$$
$$\mu = \sum_{i=1}^{2} \alpha_i \mu_i \qquad (4)$$

که $\sum_{i=1}^{2} \alpha_i = 1$.

برای مدل کشش سطحی از نیروی سطحی پیوسته پیشنهاد شده توسط برک‌بیل و همکاران [20] استفاده شده است. برای GLRهای 1.24% و 4.9%، با توجه به بالا بودن دبی گاز ورودی، اثر تراکم‌پذیری گاز نیتروژن نیز لحاظ شده است. ضمناً اثر نیروی گرانشی نیز در همه GLRها درنظر گرفته شده است.

## 3-بررسی استقلال از شبکه و صحت سنجی نتایج

برای شبکه‌بندی اتمایزر گازدار از شبکه ساختاریافته چهارضلعی، مطابق شکل 2، استفاده شده است. با توجه به اینکه مبنای اعتبار سنجی نتایج ضخامت فیلم در خروجی اتمایزر می‌باشد لذا مقادیر کسر حجمی آب در مقطعی که 3mm بالاتر از روزنه تخلیه قرار دارد برای GLR=1.24% و برای تعداد شبکه-های 20000، 40000، 80000 و 160000 مطابق شکل 3 رسم شد. همان‌طور که از شکل 3 مشخص است، نتایج حل در شبکه با تعداد سلول محاسباتی 80000 و 160000 تقریباً بر هم منطبق هستند. بنابراین شبکه با 80000 سلول محاسباتی به عنوان شبکه مستقل برای شبیه‌سازی‌های بعدی جریان انتخاب شد.

به منظور صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی، ضخامت فیلم مایع در 3mm بالاتر از روزنه تخلیه برای GLRهای مختلف محاسبه و با نتایج حاصل از فرمول تجربی بدست آمده توسط لین و همکاران [11] مقایسه شده است. برای اندازه‌گیری ضخامت فیلم مایع در مقطع موردنظر نیز، از نصف میانگین طولی کسر حجمی آب در بازه زمانی مناسب (با توجه به شکل‌های 4 تا 7، مدتی بعد از خروج کامل نیتروژن از مجرای تخلیه، برای GLR=0.08% در بازه زمانی 0.08-0.1s، برای GLR=32% در بازه زمانی 0.06-0.08s، برای GLR=1.24% در بازه زمانی 0.023-0.025s و برای GLR=4.9% در بازه زمانی 0.008-0.01s) میانگین زمانی گرفته می‌شود که رابطه ریاضی آن به صورت رابطه (5) است:

$$b = \frac{1}{2(t_2 - t_1)} \sum_{j=1}^{n} \Delta t_j \left( \frac{\sum_{i=1}^{m} \alpha_i \Delta x_i}{2} \right) \qquad (5)$$

در رابطه (5)، $b$ ضخامت فیلم مایع در 3mm بالاتر از روزنه تخلیه، $n$ تعداد گام‌های زمانی در بازه زمانی $t_1$ تا $t_2$، $m$ تعداد سلول‌ها در مقطع خروجی اتمایزر و $\alpha$ کسر حجمی آب در هر سلول است. نمودار شکل 3 نتایج این صحت‌سنجی را نشان می‌دهد.

با توجه به نمودار شکل 4 و با مقایسه نتایج کار حاضر با نتایج تجربی، مشاهده می‌شود که نتایج شبیه‌سازی دوبعدی حاضر، مخصوصاً در GLRهای میانی که درصد خطای نسبی کمتر از 15% است، مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد که حاکی از کارآمدگی مدل‌های بکار رفته در شبیه‌سازی است.

به منظور بررسی اثر تراکم‌پذیر فرض کردن گاز نیتروژن، میدان جریان درون اتمایزر گازدار برای GLR=1.24% هم با فرض تراکم‌ناپذیر بودن گاز نیتروژن و هم با فرض تراکم‌پذیر بودن آن حل و نتایج به صورت جدول 1 باهم مقایسه شده است.

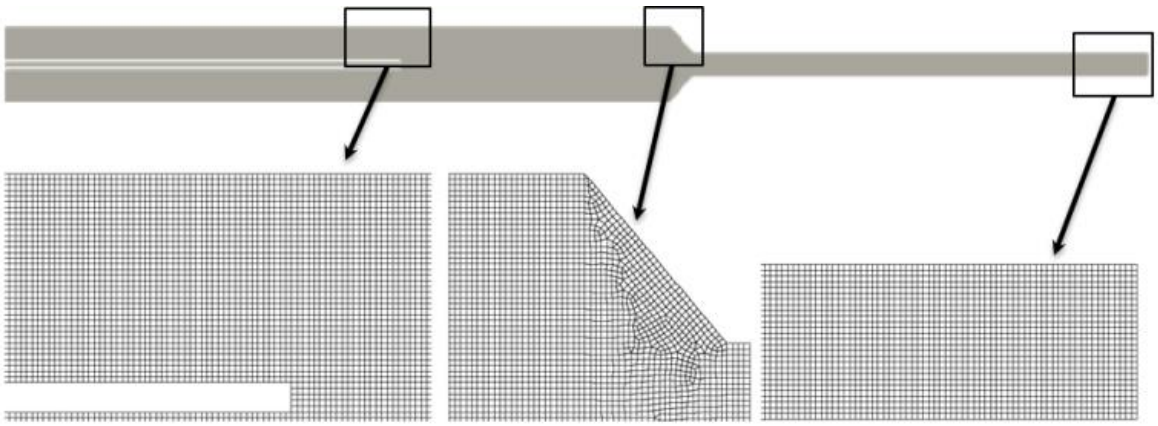

**Fig. 2** meshing strategy in different parts of effervescent atomizer

**شکل 2** روش شبکه‌بندی در قسمت‌های مختلف اتمایزر گازدار

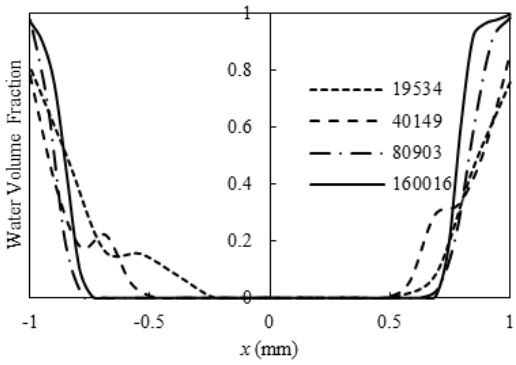


**Fig. 3** Water volume fraction quantities at the 3 mm upstream of the discharge orifice for various number of grids in GLR=1.24%

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

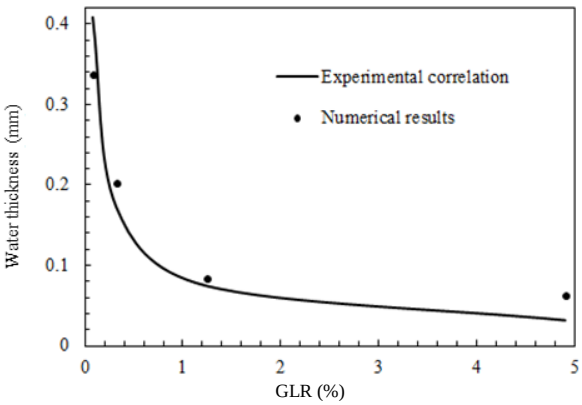


**Fig. 4** The liquid film thickness of computed results in different aerating gas flow rates compare with measured thickness by Lin et al. [11].

**شکل 4** ضخامت فیلم مایع بدست آمده در نسبت‌های هوادهی مختلف در مقایسه با ضخامت اندازه‌گیری شده توسط لین و همکاران [11].

**جدول 1** بررسی اثر تراکم‌پذیری گاز نیتروژن برای GLR=1.24%

**Table1** Studying the effect of nitrogen compressibility for GLR=1.24%

| | ضخامت فیلم مایع خروجی (mm) | درصد خطای نسبی |
|---|---|---|
| آزمایش لین و همکاران [11] | 0.075 | - |
| شبیه‌سازی حاضر با فرض تراکم‌ناپذیر بودن گاز نیتروژن | 0.086 | 14.7 |
| شبیه‌سازی حاضر با فرض تراکم‌پذیر بودن گاز نیتروژن | 0.084 | 12 |

با توجه به نتایج جدول 1، می‌توان نتیجه گرفت که برای دبی مایع 0.38 L/min، تا نسبت دبی جرمی گاز به مایع 1.24%، با وجود بالا بودن سرعت گاز ورودی به اتمایزر (تا حدود 150 m/s)، تراکم‌پذیر فرض کردن گاز نیتروژن تنها در حدود 3% باعث کاهش درصد خطای نسبی شده است.

علت اینکه تراکم‌پذیر فرض کردن گاز نیتروژن تأثیر چشمگیری در ضخامت فیلم مایع نداشته است را می‌توان در پایین آمدن سرعت گاز در برخورد با فاز مایع بلافاصله بعد از بیرون آمدن از مجرای هوادهی و تبادل سرعت آن با آب با سرعت نسبتاً پایین در محفظه اختلاط دانست.

در واقع سرعت بالای گاز نیتروژن در محدوده کمی از هندسه حل اتفاق می‌افتد و بعد از آن این سرعت بالا تا حدی اعتدال می‌یابد.

## 4-ارائه و تحلیل نتایج

به منظور بررسی نوع رژیم‌های جریان دوفازی در محفظه اختلاط و مجرای تخلیه و ارتباط آن با اسپری خارج‌شونده از اتمایزر، کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن در درون اتمایزر گازدار و در زمان‌های مختلف رسم و به ترتیب در شکل‌های 5 تا 8، برای GLRهای 0.08%، 0.32%، 1.24% و 4.9% نشان داده شده است. هم‌چنین در هر یک از شکل‌ها، نمای نزدیکتر کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن درون مجرای تخلیه، از زمانی که گاز نیتروژن وارد این مجرا می‌شود، نیز نشان داده شده است.

با توجه به شکل‌های 5 تا 8، با گذشت زمان و ورود فاز گازی نیتروژن به درون فاز مایع آب، یک جریان دوفازی درون محفظه اختلاط شکل می‌گیرد که به مرور زمان به سمت پایین دست هدایت می‌شود و فاز گازی، بسته به GLR مورد استفاده، پس از گذشت زمان مناسب، خود را به روزنه تخلیه می‌رساند. در شکل 5، که مربوط به GLR پایین (0.08%) است، بدلیل دبی پایین گاز، جریان دوفازی درون مجرای تخلیه اتمایزر گازدار، بعد از 0.08s، به صورت حبابی با حباب‌های کشیده و باریک در می‌آید. این حباب‌های گازی باعث کاهش سهم مایع در سطح مقطع مجرا و افزایش سرعت آن می‌شوند که هر دو اثر باعث بهبود اتمیزاسیون خواهد شد. از طرف دیگر، در فواصل بین دو حباب متوالی، سطح مقطع مجرا تماماً با فاز مایع اشغال شده و در نتیجه قطرات اسپری حاصل از آن درشت‌تر خواهد بود که همین امر موجب غیریکنواخت شدن اسپری خارج‌شونده خواهد شد. با توجه به این شکل پیش‌بینی می‌شود که اگر مقدار دبی جرمی گاز از این مقدار نیز کمتر باشد، از کشیدگی حباب‌های تشکیل شده در مجرای تخلیه کاسته شده و نهایتاً در دبی‌های خیلی پایین به صورت حباب‌های کروی ظاهر شوند. در آن صورت اسپری حاصل از این رژیم جریان به دلیل خروج متوالی حباب‌های گازی بسیار ناپایدار خواهد بود.

در شکل 6، با افزایش GLR به 0.32%، جریان درون محفظه اختلاط به دلیل سرعت بیشتر فاز گازی متلاطم‌تر شده است. در مجرای تخلیه نیز، حباب‌های کشیده به هم متصل شده و نهایتاً پس از گذشت حدود 0.06s جریان دوفازی درون مجرای تخلیه به جریان حلقوی تبدیل می‌شود. تبدیل جریان حبابی با حباب‌های کشیده به جریان حلقوی در مجرای تخلیه باعث خواهد شد که در عین حفظ مزیت کاهش مقطع مایع و ریزتر شدن قطرات، مشکل غیریکنواخت بودن اسپری حاصل در اثر خروج توده‌های مایع بین حباب‌ها نیز رفع شود. در نتیجه اسپری حاصل از این رژیم جریان داخل مجرای تخلیه اسپری مطلوبی خواهد بود.

با افزایش بیشتر GLR به 1.24% و 4.9%، در شکل‌های 7 و 8، تقریباً کل حجم محفظه اختلاط توسط فاز گازی اشغال می‌شود و در مجرای تخلیه نیز در اثر افزایش سرعت فاز گازی، فاز مایع بیشتر به سمت دیواره‌ها فشرده شده و درنتیجه ضخامت فیلم مایع تشکیل شده، همان‌طور که در نمودار شکل 4 نیز نشان داده شد، کاهش می‌یابد.

با افزایش مقدار GLR، مطابق نمودار شکل 4، در ابتدا ضخامت فیلم مایع تا GLR=1.24%، به علت انتقال رژیم جریان از حبابی به حلقوی، با شیب تندی کاهش پیدا می‌کند. ولی از GLR، 1.24% به 4.9%، به دلیل حاکم بودن رژیم جریان حلقوی، تغییر چندانی در کاهش ضخامت فیلم مایع وجود ندارد. در واقع در رژیم جریان حلقوی افزایش بیشتر مقدار GLR تأثیر زیادی در بهبود فرایند اتمیزاسیون نخواهد داشت.

برای بررسی مکانیزم ناپایداری سطح مشترک دوفاز مایع و گاز در رژیم جریان حلقوی درون مجرای تخلیه اتمایزر گازدار و مقایسه بهتر این مکانیزم

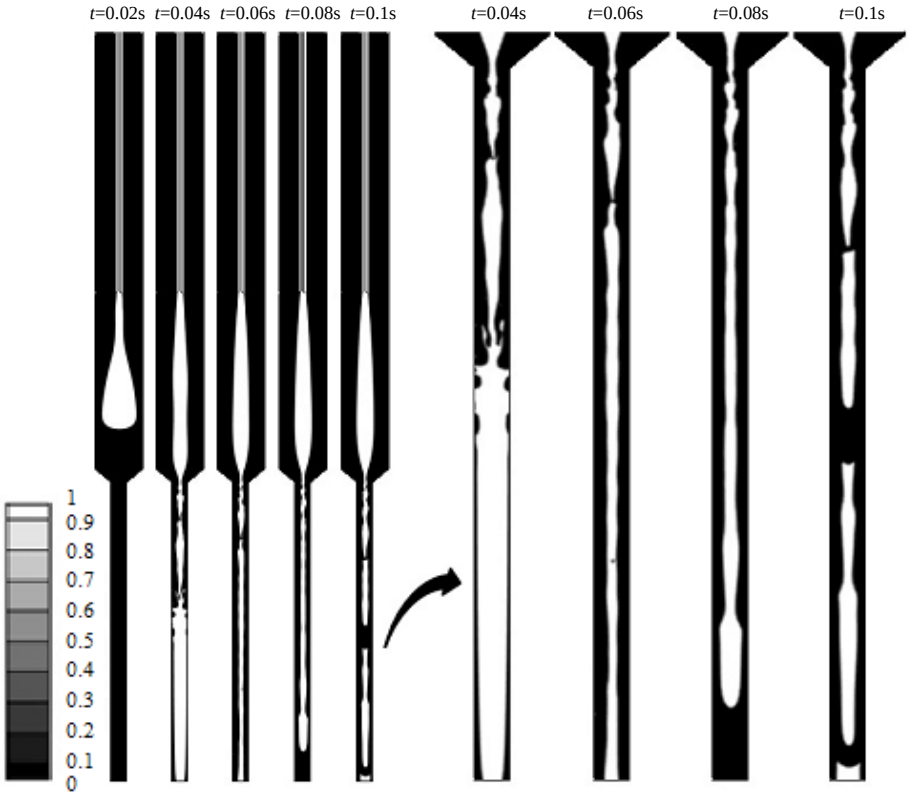


**Fig. 5** Contours of volume fraction of Nitrogen within effervescent atomizer in different times for GLR=0.08%

**شکل 5** کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن در زمان‌های مختلف درون اتمایزر گازدار برای GLR=0.08%.

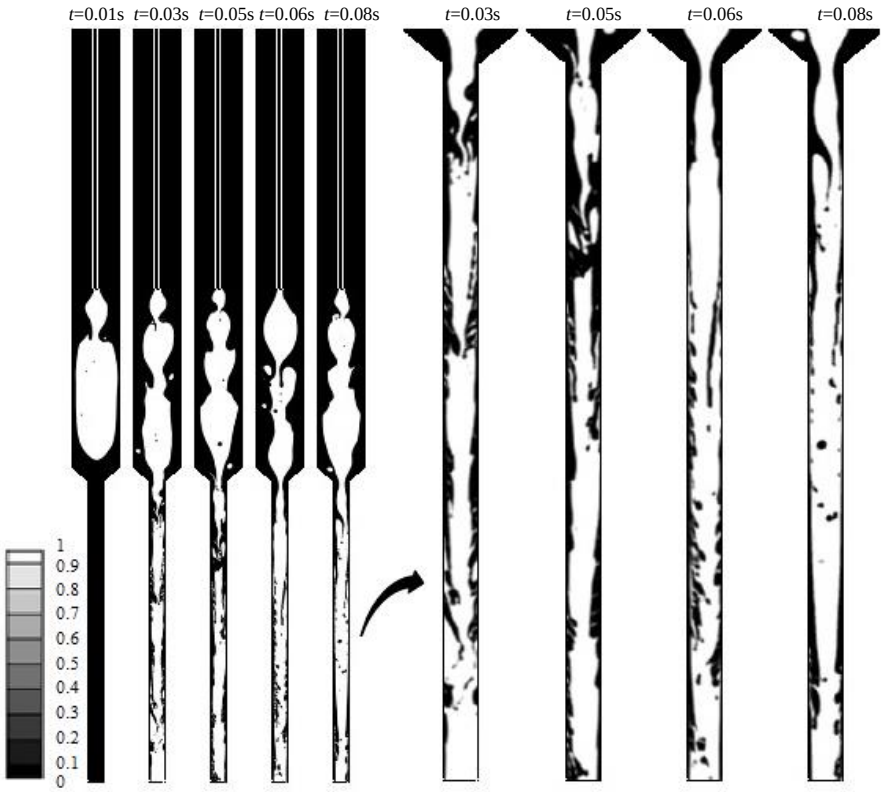


**Fig. 6** Contours of volume fraction of Nitrogen within effervescent atomizer in different times for GLR=0.32%

**شکل 6** کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن در زمان‌های مختلف درون اتمایزر گازدار برای GLR=0.32%.

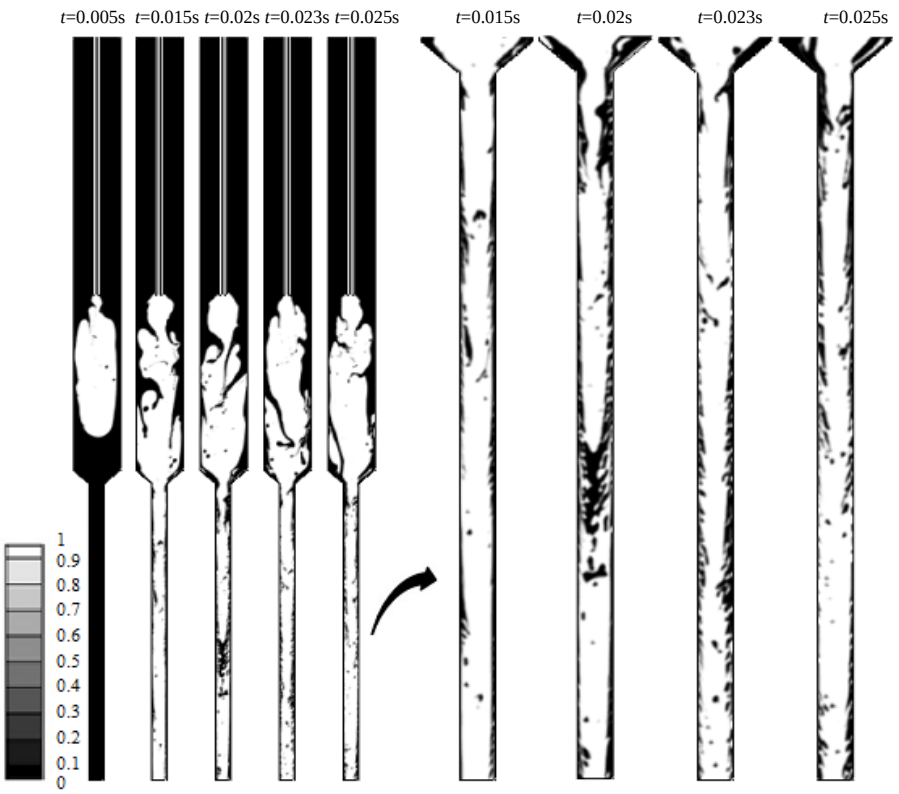


**Fig. 7** Contours of volume fraction of Nitrogen within effervescent atomizer in different times for GLR=1.24%

**شکل 7** کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن در زمان‌های مختلف درون اتمایزر گازدار برای GLR=1.24%.

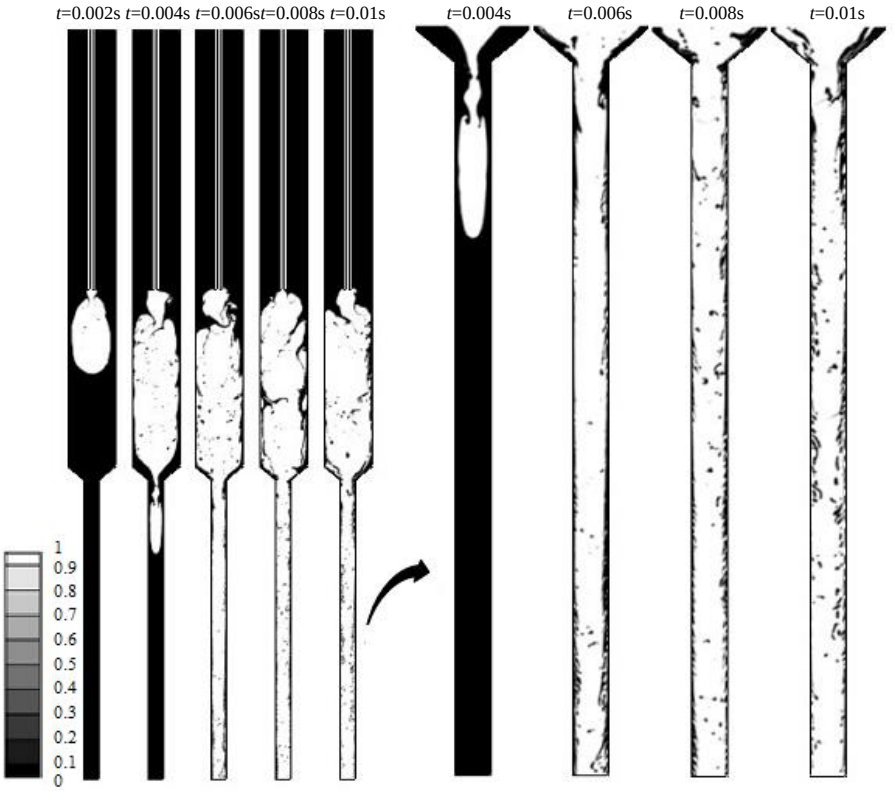


**Fig. 8** Contours of volume fraction of Nitrogen within effervescent atomizer in different times for GLR=4.9%

**شکل 8** کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن در زمان‌های مختلف درون اتمایزر گازدار برای GLR=4.9%.

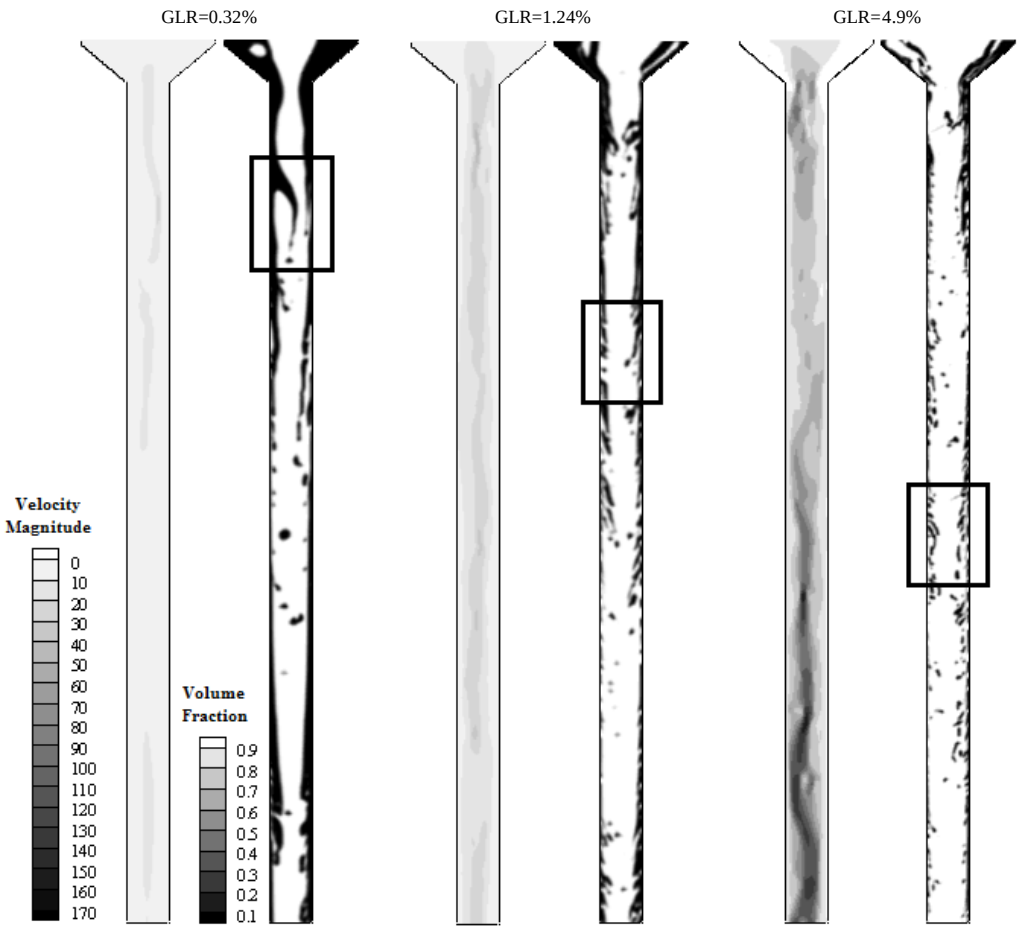


**Fig. 9** Contours of volume fraction of Nitrogen and velocity magnitude for GLRs

**شکل 9** کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن و اندازه سرعت برای GLRهای مختلف

در GLRهای مختلف، کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن به همراه کانتورهای سرعت مربوط به جریان‌های حلقوی درون مجرای تخلیه برای GLRهای 0.32%، 1.24% و 4.9%، مدتی پس از خارج شدن کامل گاز نیتروژن از روزنه تخلیه، در شکل 9 نشان داده شده است.

با توجه به کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن و سرعت در شکل 9، با عبور فاز گازی از روی فاز مایع در مجرای تخلیه و در اثر اختلاف سرعت دوفاز و نیز بیشتر بودن سرعت فاز گازی که در مرکز مجرا قرار دارد، شاهد ناپایداری کلوین- هلمهولتز در سطح مشترک دوفاز هستیم. در GLR=0.32% این ناپایداری در بعضی از بخش‌های سطح مایع باعث بلند کردن تکه‌هایی از مایع به صورت لیگامنت‌های کشیده از سطح آن شده و ناپایداری‌های سطح خود این لیگامنت‌ها نیز به دلیل اینکه در معرض جریان فاز گازی سرعت بالا قرار دارند تشدید شده و نهایتاً به صورت قطرات درشت و در صورت داشتن زمان کافی به قطرات ریزتر در داخل مجرای تخلیه فرومی‌پاشند.

با افزایش سرعت فاز گازی در GLR=1.24%، سرعت بالای گاز اجازه جدا شدن لیگامنت‌های کشیده را به سطح مایع نداده و در واقع به محضبلند شدن این لیگامنت‌ها، توسط فاز گاز به قطرات می‌شکنند. مکانیزم مشابهی در حالتی که GLR=4.9% به وضوح دیده می‌شود که لیگامنت‌های جدا شده از سطح مایع به صورت بسیار باریک و تکه تکه هستند و گاهاً به دلیل سرعت بالای گاز به صورت قطرات ریز از سطح مایع جدا می‌شوند و در واقع رژیم جریان حلقوی تا حدودی به رژیم جریان قطره‌ای[1] با قطرات ریز که به صورت مه‌آلود است تبدیل می‌شود.

## 5-نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر میدان جریان داخلی اتمایزر گازدار، برای مقادیر مختلف دبی جرمی گاز به مایع، 0.08%، 0.32%، 1.24% و 4.9%، و برای دبی مایع 0.38 L/min به کمک مدل دوفازی حجم سیال شبیه‌سازی و نتایج به صورت کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن نمایش داده شده است. در نسبت‌های دبی جرمی گاز به مایع بالا، با توجه به بالا بودن دبی ورودی گاز نیتروژن، این گاز به صورت تراکم‌پذیر فرض شده و اثر نیروی گرانشی نیز لحاظ شده است. ضمن اینکه نتایج بدست آمده، مطابقت خوبی با نتایج تجربی داشته‌اند و نشان‌دهنده ناپایداری‌های سطح مایع در مجرای تخلیه اتمایزر گازدار می‌باشند، تأییدکننده این مطلب نیز هستند که اتمایزر گازدار در رژیم جریان داخلی حلقوی به دلیل ضخامت بسیار کم مایع در مقایسه با عرض روزنه تخلیه، پایدار بودن رژیم آن و ناپایدار بودن سطح فیلم مایع بسیار مستعد یک اتمیزاسیون مطلوب است. در واقع با افزایش نسبت دبی جرمی گاز به مایع و انتقال رژیم جریان دوفازی داخل اتمایزر گازدار از رژیم جریان حبابی به رژیم جریان حلقوی ضخامت فیلم مایع خارج شونده از روزنه تخلیه کاهش می‌یابد. این کاهش ضخامت در ابتدا به دلیل تغییر رژیم جریان از حبابی به حلقوی

[1] Misty

با شیب تند بوده ولی در نسبت دبی جرمی گاز به مایع بالا که رژیم جریان حلقوی در مجرای تخلیه حاکم است، تغییر چندانی نخواهد داشت. هم‌چنین در رژیم جریان حلقوی، در درون مجرای تخلیه، به دلیل ناپایداری کلوین-هلمهولتز لیگامنت‌هایی از سطح مایع جدا می‌شوند که خود در اثر سرعت بالای هسته گازی به قطرات ریز و به صورت مه‌آلود تغییر رژیم می‌دهند. این لیگامنت‌ها با افزایش نسبت دبی جرمی گاز به مایع کوتاه‌تر و باریک‌تر و در نتیجه ناپایدارتر خواهند شد.

## 6-مراجع

[1] A. H. Lefebver, *Atomization and Sprays*, pp. 1-10, New York: Hemisphere Publication, 1989.

[2] H. Liu, *Science and Engineering of Droplets: Fundamentals and Applications*, pp. 20-63, Norwich, New York, Noyes Publications, 2000.

[3] B. Pengbo, X. Yuming, W. Ze, Experiment study and simulation research for atomization characteristics of the internal-mixing twin-fluid atomizer, *4th International Conference on Inteligent System and Applied Material*, Taiyuan, China, August 23-24, pp. 1075-82, 2014.

[4] 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.

[5] L. J. Qian, J. Z. Lin, Modeling on effervescent atomization: A review, Physics, Mechanics & Astronomy, *Science China Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, Vol. 54, No.12, pp. 2109-29, 2011.

[6] J. D. Whitlow, A. H. Lefebvre, Effervescent atomizer operation and spray characteristics, *Atomization Sprays*, Vol. 3, No. 2, pp. 137-156, 1993.

[7] P. J. Santangelo, P. E. Sojka, A holographic investigation of near-nozzle structure of an effervescent atomizer-produced spray, *Atomization and Sprays*, Vol. 5, No. 2, pp. 137-155, 1995.

[8] J. S. Chin, A. H. Lefebvre, Flow patterns in internal-mixing twin-fluid atomizers, *Atomization and Sprays*, Vol. 3, No. 5, pp. 463–475, 1993.

[9] J. Y. Kim, S. Y. Lee, Dependence of spraying performance on the internal flow pattern in effervescent atomizers, *Atomization and Sprays*, Vol. 11, No. 6, pp. 735-756, 2001.

[10] U. K. Sarkar, K. Ramamurthi, Flow visualization of sprays formed by bubbly, slug, and annular flows in an effervescent atomizer, *Journal of Flow Visualization & Image Processing*, Vol. 14, No. 4, pp. 397-408, 2007.

[11] 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, UT, United States, July 8-11, 2001.

[12] J. T. K. Luong, P. E. Sojka, Unsteadiness in effervescent sprays, *Atom Sprays*, Vol. 9, No. 1, pp. 87-109, 1999.

[13] J. Jedelsky, M. Jicha, Unsteadiness in effervescent sprays: A new evalution method and influence of operational conditions, *Atom Sprays*, Vol. 18, No. 1, pp. 49-83, 2008.

[14] H. Gadgil, A. Dolatabadi, B. N. Raghunandan, Mass distribution studies in effervescent sprays, *Atomization and Sprays*, Vol. 21, No. 5, pp. 375-390, 2011.

[15] M. Tian, J. R. Edwards, K. C. Lin, T. A. Jackson, Numerical simulation of transient two-phase flow within aerated-liquid injectors, *33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, AIAA paper, 2003.

[16] S. A. Esfarjani, A. Dolatabadi, A 3D simulation of two-phase flow in an effervescent atomizer for suspension plasma spray, *Surface & Coating Technology*, Vol. 203, No. 15, pp. 2074-80, 2009.

[17] 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.

[18] D. A. Cassidy, J. Choi, M. Tian, J. A. Edwards., Numerical simulation of two-phase flow within an aerated liquid injector, *48thAIAA Aerospace Sciences Meeting*, Florida, Orlando, January 4-7, 2010.

[19] A. Helmy, S. Wilson, A. Siam,A. Balabel., Numerical modeling of two-phase flow in an effervescent atomizer using volume of fluid method, *International Journal of Modern Physics and Applications*, Vol. 1, No. 4, pp. 186-192, 2015.

[20] J. U. Brackbill, D. B. Kothe, C. Zemach, Aconitum method for modeling surface tension, *Journal of Computational Physics*, , Vol. 100, No. 2, pp. 335-354, 1992.