

## مطالعه عددی جریان سه‌بعدی داخل مجرای تخلیه اتمایزر مایع هوادهی شده در نسبت‌های هوادهی مختلف

زهرا علیزاده کاکلر<sup>۱</sup> و محمدرضا انصاری<sup>۲\*</sup>

۱- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، z.alizadehkaklar@modares.ac.ir

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، mra\_1330@modares.ac.ir

\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۹/۱۱/۰۶، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۹/۰۷/۲۳، پذیرش: ۹۹/۰۸/۰۷)

**چکیده:** میدان جریان دوفازی در بالادست روزنه تخلیه اتمایزر مایع هوادهی شده، در دبی مایع ۰/۳۸ لیتر در دقیقه و در نسبت‌های دبی جرمی گاز به مایع مختلف ۰/۳۲٪، ۰/۶۲٪ و ۱/۲۴٪، به صورت عددی مطالعه شده است. شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان داخل اتمایزر با استفاده از روش حجم سیال انجام شده است. به دلیل سرعت بالای گاز هوادهی در روزنه‌های خروجی لوله هوادهی، این گاز در همه نسبت‌های هوادهی به صورت گاز ایدئال فرض شده است. نتایج مطالعه برای هر نسبت هوادهی به صورت کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن در زمان‌های مختلف و کانتورهای سرعت ارائه شده است. کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن، مطابق نتایج تجربی، نشان‌دهنده غالب بودن رژیم جریان حلقوی در درون مجرای تخلیه اتمایزر شبیه‌سازی شده در همه نسبت‌های هوادهی مورد بررسی است. همچنین، مشاهده شد که با افزایش میزان هوادهی، علاوه بر کاهش ضخامت فیلم مایع در مجرای تخلیه، تغییرات این ضخامت در طول مجرا نیز کاهش می‌یابد. از این رو، می‌توان پیش‌بینی کرد که قطرات اسپری حاصل از اتمایزر مایع هوادهی شده در نسبت‌های هوادهی بالاتر، به دلیل کاهش ضخامت فیلم مایع در مجرای تخلیه، ریزتر بوده و به دلیل کم‌تر شدن تغییرات ضخامت فیلم مایع درون این مجرا، یکنواخت‌تر باشد.

**کلیدواژگان:** اتمایزر مایع هوادهی شده، جریان دوفازی، نسبت دبی جرمی گاز به مایع، روش حجم سیال

### مقدمه

برای اتمیزاسیون سوخت در سیستم‌های احتراقی، عمدتاً از اتمایزرهای فشاری، فشاری چرخشی و یا دوسیالی استفاده می‌شود. اتمایزرهای دوسیالی، به دلیل مزیت‌هایی از قبیل نیاز به فشار پایین‌تر سوخت، اسپری ریزتر و انتشار کمتر آلودگی به صورت گسترده به کار می‌روند [۱]. همچنین، اتمایزرهای دوسیالی اختلاط داخلی، که در آن‌ها برخورد بین گاز اتمیزه کننده سرعت بالا و مایع درون بدنه اتمایزر اتفاق می‌افتد، به دلایلی از قبیل کیفیت اتمیزاسیون بالا، مصرف کمتر هوای فشرده و یکنواختی مطلوب در فرایند پودرسازی، کاربردهای گسترده‌ای از جمله در توربین‌های گازی صنعتی و دیگ‌های بخار دارند [۱]. اتمایزر مایع هوادهی شده<sup>۱</sup> در دسته اتمایزرهای دوسیالی اختلاط داخلی قرار می‌گیرد که برخلاف سایر انواع اتمایزرهای دوسیالی، گاز اتمایزر برای تشکیل مخلوط دوفازی در بالادست روزنه تخلیه به درون مایع تزریق می‌شود [۲]. مکانیزم جریان داخلی اتمایزر مایع هوادهی شده باعث شده است که این نوع اتمایزر نسبت به اتمایزرهای تک‌سیالی و سایر اتمایزرهای دوسیالی برتری‌هایی داشته باشد که منجر به توجه خاص به این نوع اتمایزرها در دهه‌های اخیر شده است [۳]. از جمله مزایای اتمیزاسیون به روش مایع هوادهی شده در کاربردهای توربین گاز می‌توان به کیفیت بالای اتمیزاسیون این روش حتی در فشارهای پاشش و دبی‌های

1. Effervescent atomizer

پایین هوا اشاره کرد. همچنین، به دلیل امکان استفاده از مجاری و روزنه‌های بزرگ‌تر در این روش، مشکلات مربوط به گرفتگی مجاری و روزنه‌ها تا حد زیادی کاهش می‌یابد. به علاوه، به دلیل هوادهی اسپری، از طریق حضور حباب‌های هوا در آن، تولید دوده و دود خروجی کاهش پیدا می‌کند. قابلیت اطمینان بالا، تعمیر آسان و قیمت پایین، به دلیل سادگی دستگاه، نیز از دیگر مزایای این روش است [۴]. از این میان، امکان استفاده از مجاری و روزنه‌های بزرگ‌تر می‌تواند مزیت مهمی برای سیستم‌های احتراقی سوزاننده سوخت‌های باقی‌مانده، سوخت‌های مایع یا هر نوع سوخت دیگری که فرایند اتمیزاسیون آن به دلیل گرفتگی نازل مستلزم استفاده از روزنه و مجرای با اندازه بزرگ است، باشد. در این نوع اتمایزرها، جریان دوفازی گاز-مایع درون اتمایزر نقش مهمی در تعیین عملکرد آن دارد، در حالی که درک فعلی از جریان داخلی اتمایزر مایع هوادهی شده نسبتاً محدود است [۵].

تاکنون مطالعات تجربی زیادی روی ویژگی‌های جریان دوفازی داخل اتمایزر مایع هوادهی شده و همچنین تأثیر آن بر مشخصه‌های اسپری حاصل انجام شده است. با این حال، مطالعات عددی که روی جریان دوفازی درون اتمایزر مایع هوادهی شده انجام شده‌اند، به دلیل پیچیدگی بسیار زیاد رفتار آماری پدیده دوفازی، نسبتاً کم هستند. نتایج مطالعات تجربی نشان‌دهنده انتقال رژیم جریان دوفازی درون محفظه اختلاط و مجرای تخلیه، به ترتیب از رژیم جریان حبابی به لخته‌ای<sup>۱</sup> و سپس به حلقوی، متناسب با افزایش نسبت دبی جرمی گاز به مایع<sup>۲</sup> (نسبت هوادهی) است [۶-۸]. لین و همکاران [۹] آزمایش‌های مفصلی را روی ساختارهای جریان دوفازی درون اتمایزر مایع هوادهی شده و اسپری‌های مربوطه در میزان هوادهی‌های مختلف انجام دادند. آن‌ها در آزمایش‌هایشان از پنج نوع مجرای هوادهی مختلف برای تولید رژیم‌های مخلوط دوفازی متفاوت استفاده کرده و ضخامت فیلم مایع در مجرای تخلیه را برای نسبت‌های دبی جرمی گاز به مایع و دبی‌های مایع مختلف اندازه‌گیری کردند. مشاهدات آن‌ها نشان داد که افزایش جریان گاز هوادهی، باعث نازک‌تر شدن فیلم مایع در ساختار جریان حلقوی در مجرای تخلیه و در نتیجه بهبود فرایند اتمیزاسیون می‌شود.

در بیشتر مطالعات عددی انجام‌شده روی جریان داخلی اتمایزر مایع هوادهی شده، اتمایزر نوع پنج آزمایش‌شده توسط لین و همکاران [۹]، از آن جهت که لوله هوادهی آن تک‌سوراخه بوده و برای شبیه‌سازی عددی راحت‌تر است، انتخاب شده است. تیان و همکاران [۱۰] ساختار جریان دوفازی درون این اتمایزر را با استفاده از مدل مخلوط<sup>۳</sup> دوفازی برای دو نسبت هوادهی ۰/۰۸٪ و ۲/۴۵٪ به صورت دوبعدی و سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی دوبعدی آن‌ها برای نسبت هوادهی ۰/۰۸٪ نشان‌دهنده ترکیبی از رژیم جریان دوفازی لخته‌ای و حلقوی درون اتمایزر و نتایج شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی آن‌ها نشان‌دهنده غالب بودن رژیم جریان حلقوی برای نسبت هوادهی ۲/۴۵٪ است. به علاوه نتایج به دست آمده توسط این محققین به خوبی با نتایج تجربی سازگار بوده است. علیزاده و انصاری [۱۱] نیز جریان دوفازی درون این اتمایزر را برای نسبت‌های هوادهی مختلف و با در نظر گرفتن اثر تراکم‌پذیری گاز نیتروژن در نسبت‌های هوادهی بالا، با استفاده از روش حجم سیال<sup>۴</sup>، به صورت دوبعدی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها، به کمک شبیه‌سازی دوبعدی و با استفاده از مدل‌های به کار گرفته شده، مشاهده کردند که با افزایش نسبت هوادهی، رژیم جریان دوفازی درون مجرای تخلیه از رژیم جریان حبابی با حباب‌های کشیده به رژیم جریان حلقوی انتقال می‌یابد. آن‌ها، همچنین، با تغییر طول محفظه اختلاط این اتمایزر در نسبت‌های هوادهی مختلف مشاهده کردند که در نسبت دبی جرمی گاز به مایع پایین افزایش طول محفظه اختلاط باعث افزایش ضخامت فیلم مایع خارج‌شونده از اتمایزر می‌شود، در حالی که در نسبت دبی جرمی گاز به مایع بالا عکس این حالت اتفاق می‌افتد [۱۲]. ساختار سه‌بعدی جریان دوفازی درون اتمایزر نوع پنج آزمایش‌شده توسط لین و همکاران [۹] توسط اسفراجانی و دولت‌آبادی [۱۳] با استفاده از روش

1. Slug  
2. Gas-Liquid ratio (GLR)  
3. Mixture  
4. Volume of Fluid (VOF)

نشان‌گر و سلول چندسیالی<sup>۱</sup> مدل‌سازی شد. آن‌ها رفتار فیلم مایع حاوی نانوذرات در مجرای تخلیه را برای نسبت‌های هوادهی مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه این محققین نشان‌دهنده افزایش اختلاط بین فاز گاز و مایع با افزایش میزان هوادهی و تغییر ساختار جریان از جریان لخته‌ای به جریان حلقوی در نزدیکی خروجی نازل است. همین‌طور نتایج آن‌ها نشان‌دهنده عدم تأثیر قابل توجه غلظت نانوذرات بر ضخامت فیلم مایع خروجی از اتمایزر، در صورت تغییر سیال در محدوده سیال نیوتنی، است. محمود و مسعود [۱۴] جزئیات جریان دوفازی داخل اتمایزر مایع هوادهی شده را به کمک روش حجم سیال به‌دست آوردند. آن‌ها برای مقایسه مطلوب روش حجم سیال و روش نشان‌گر و سلول چندسیالی، هندسه و اندازه شبکه و دیگر جزئیات کار خود را همانند کار اسفرجانی و دولت‌آبادی [۱۳] انتخاب کردند. با این حال، به‌منظور به‌دست‌آوردن پدیده جریان واقعی، برخلاف کار اسفرجانی و دولت‌آبادی [۱۳]، که نصف ناحیه را مدل‌سازی کرده بودند، از مدل کامل سه‌بعدی استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها ضمن تطابق نزدیک با نتایج منتشرشده قبلی، خطای محاسباتی کمتری نیز نسبت به کار اسفرجانی و دولت‌آبادی [۱۳] داشت. هلمی و همکاران [۱۵] نیز جریان داخلی اتمایزر مایع هوادهی شده نوع پنج لین و همکاران [۹] را با استفاده از روش حجم سیال در نسبت‌های هوادهی کمتر از ۰/۸٪ و برای سوخت هواپیمایی Jet-A1 شبیه‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها مطابقت خوبی با نتایج تجربی داشت و نشان‌دهنده سه رژیم جریانی لخته‌ای، لخته‌ای-حلقوی و حلقوی در مجرای تخلیه برای میزان هوادهی‌های مختلف بوده است.

با توجه به اهمیت ماهیت جریان دوفازی در بالادست روزه تخلیه اتمایزر مایع هوادهی شده بر مشخصات اسپری حاصل از این اتمایزر، در مطالعه حاضر جریان دوفازی درون مجرای تخلیه اتمایزر مایع هوادهی شده نوع یک لین و همکاران [۹] به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. لوله هوادهی اتمایزر نوع یک آزمایش‌شده توسط لین و همکاران [۹] دارای شانزده سوراخ هواده است. بنابراین، مخلوط جریان دوفازی تشکیل شده درون آن نسبت به چهار نوع اتمایزر مورد آزمایش دیگر توسط این محققین، به دلیل تعداد بیشتر سوراخ‌های هوادهی، همگن‌تر بوده و اسپری حاصل از آن نیز یکنواخت‌تر است. از این رو، در مطالعه حاضر این اتمایزر برای اولین بار به‌صورت سه‌بعدی (به دلیل ماهیت سه‌بعدی جریان دوفازی و آشفتگی) شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی میدان جریان دوفازی درون این اتمایزر به کمک نرم‌افزار انسیس فلونت<sup>۲</sup> در دبی مایع ۰/۳۸ لیتر در دقیقه و در نسبت‌های دبی جرمی گاز به مایع مختلف ۰/۳۲٪، ۰/۶۲٪ و ۱/۲۴٪، منطبق بر کار لین و همکاران [۹] و با استفاده از روش حجم سیال انجام شده است. همچنین، برای در نظر گرفتن اثر تراکم‌پذیری گاز هوادهی، به دلیل بالا بودن سرعت این گاز در سوراخ‌های لوله هوادهی، فاز گازی در شبیه‌سازی‌ها به‌صورت گاز ایدئال در نظر گرفته شده است. نتایج بررسی عددی جریان دوفازی درون مجرای تخلیه این اتمایزر در نسبت‌های هوادهی مختلف به کمک کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن و سرعت ارائه شده است. به‌علاوه، به‌منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات جریان دوفازی درون این مجرا، در هر نسبت هوادهی کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن در زمان‌های مختلف نیز رسم شده است.

## هندسه اتمایزر مایع هوادهی شده مورد مطالعه

در کار حاضر، اتمایزر مایع هوادهی شده نوع یک لین و همکاران [۹] به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. در این اتمایزر، لوله هوادهی دارای دو ردیف هشت‌تایی سوراخ هواده است. بنابراین، در مجرای ورودی آب نیز جریان دوفازی تشکیل می‌شود و مخلوط همگن‌تری از جریان گاز-مایع وارد محفظه اختلاط می‌شود.

هندسه و ابعاد اتمایزر نوع یک لین و همکاران [۹] و نمای نزدیک لوله هوادهی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. در این اتمایزر، قطر لوله هوادهی ۱/۶ میلی‌متر و ضخامت آن ۰/۱ میلی‌متر است. قطر سوراخ‌های هواده نیز ۰/۲۵ میلی‌متر بوده و فاصله هر دو ردیف متوالی از سوراخ‌ها با یکدیگر ۱/۲۷ میلی‌متر است. فاصله آخرین ردیف سوراخ‌ها تا انتهای لوله هوادهی

1. Multi-Fluid Marker and Cell (MFMAC)  
2. ANSYS Fluent

۲/۵۴ میلی‌متر است. مقطع محفظه اختلاط این اتمایزر مستطیلی به ابعاد ۲ میلی‌متر × ۶/۴ میلی‌متر بوده و طول آن ۱۰ میلی‌متر است و با زاویه همگرایی ۵۰ درجه به مجرای تخلیه متصل می‌شود. مجرای تخلیه نیز ۴۰ میلی‌متر طول داشته و سطح مقطع آن مربعی به ابعاد ۲ میلی‌متر × ۲ میلی‌متر است.

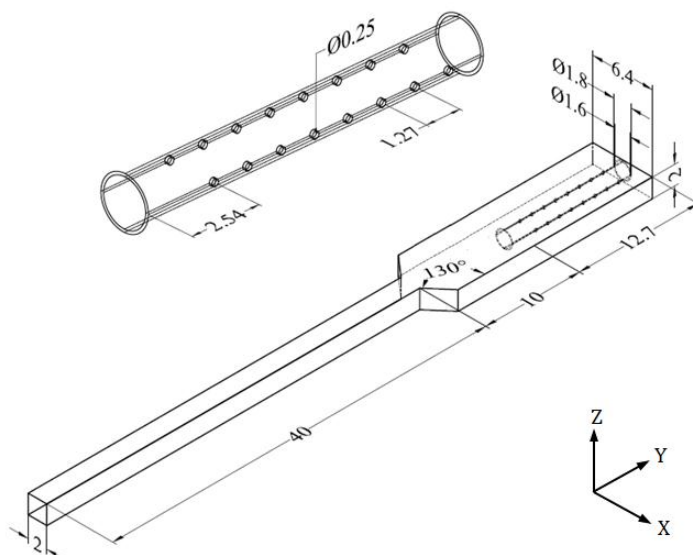


Figure 1- Geometry and dimensions of Lin et al. [9] I-type effervescent atomizer (dimensions are in millimeters)  
 شکل ۱- هندسه و ابعاد اتمایزر مایع هواده‌ی شده نوع یک لین و همکاران [۹] (ابعاد بر حسب میلی‌متر است)

### معادلات حاکم بر جریان دوفازی داخل اتمایزر مایع هواده‌ی شده

برای کاربردهای جریان دوفازی، روش‌های اویلری<sup>۱</sup> به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان سریع‌تر از روش‌های مش متحرک رشد کرده‌اند و به همین دلیل در بسیاری از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی جریان به کار می‌روند. از بین روش‌های اویلری نیز روش حجم سیال، به دلیل ردیابی دقیق سطح و داشتن مزایایی چون استفاده از یک معادله اضافی برای تسخیر سطح مشترک و قابلیت آن در بقای جرم به صورت گسترده، در شبیه‌سازی‌های جریان دوفازی به کار می‌رود [۱۶]. لذا، در پژوهش حاضر از روش حجم سیال برای تسخیر دقیق سطح مشترک استفاده شده است.

### مدل حجم سیال (VOF)

در روش‌های اویلری، سطح مشترک به وسیله میدان تابع نشانگر<sup>۲</sup>  $I(x,t)$  تعریف شده در سراسر میدان جریان، که روی مش محاسباتی ثابت به دست می‌آید، مشخص می‌شود. شکل مناسب برای تابع نشانگر، یک تابع گسسته با مقدار یک در فاز اولیه تعیین شده و مقدار صفر در فاز ثانویه است، به طوری که سطح مشترک با تغییرات تند  $I(x,t)$  واقع می‌شود. کل میدان مورد بررسی با یک سیال پوشیده می‌شود که خواص آن به صورت ناگهانی در عرض سطح مشترک مطابق فرمولاسیون به اصلاح تک‌سیالی جریان دوفازی تغییر می‌کند. بنابراین، یک میدان سرعت، فشار و دمای واحد در میان فازها به اشتراک گذاشته می‌شود و یک مجموعه واحد از معادلات جریان نوشته شده و در سراسر میدان جریان حل می‌شود. اثرات سطحی، از جمله نیروی کشش سطحی یا تغییر فاز، به صورت میدان‌های پیوسته، که در سطح مشترک منفردند، در معادلات جریان اعمال می‌شوند و بنابراین توسط توابع  $\delta$  مدل می‌شوند [۱۶].

1. Eulerian  
 2. Marker function

براساس روش اتخاذ شده برای جابه‌جایی میدان تابع نشانگر، روش‌های ردیابی سطح اویلری برای جریان‌های دوفازی را می‌توان به الگوهای ردیابی سطح مشترک<sup>۱</sup> و تسخیر سطح مشترک<sup>۲</sup> تقسیم کرد. در تسخیر سطح مشترک، موقعیت سطح مشترک در میدان تابع نشانگر به صورت ضمنی است، یعنی به صورت یک کمیت اسکالر بی‌اثر از طریق حل معادله بقا جابه‌جا می‌شود. روش حجم سیال جزو روش‌های تسخیر سطح مشترک است که تابع  $I(x,t)$  در آن تابع نشانگری است که سطح مشترک روی منحنی  $\nabla I \neq 0$  واقع شده و خواص سیال به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$b(x,t) = b_2 + (b_1 - b_2)I(x,t) \quad (1)$$

که  $b$  خاصیت نوعی سیال است و زیرنویس‌های 1 و 2 فاز اول و دوم را مشخص می‌کنند. جابه‌جایی تابع نشانگر با حل معادله انتقال زیر برای  $I$  انجام می‌شود:

$$\frac{\partial I}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla I = \frac{1}{\rho_1} \int_{\Gamma(t)} \dot{m} \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s) dS = \frac{1}{\rho_1} \dot{m} \delta_s \quad (2)$$

عبارت انتگرالی در سمت راست رابطه بالا تبادل جرم در سطح مشترک به دلیل تغییر فاز را نشان می‌دهد که  $\dot{m}$  نرخ انتقال جرم است.  $\Gamma(t)$  نشان‌دهنده سطح مشترک فازها و  $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s)$  تابع دلتای چندبعدی است که فقط در  $\mathbf{x} = \mathbf{x}_s$  غیر صفر بوده و  $\mathbf{x}_s = \mathbf{x}(S,t)$  نقاط مربوط به سطح مشترک  $\Gamma(t)$  است.

نسخه مجزایی از تابع نشانگر، انتگرال مکانی آن در حجم سلول محاسباتی است که کسر حجمی  $\alpha$  نامیده می‌شود:

$$\alpha = \frac{1}{V} \int_V I(\mathbf{x}) dV \quad (3)$$

در این رابطه حجم سلول است. کسر حجمی نسبت حجم سلول اشغال شده توسط فاز اول را نشان می‌دهد که اگر سلول با فاز اول پر شود،  $\alpha = 1$ ، اگر سلول با فاز دوم پر شود،  $\alpha = 0$  و برای سلول با سطح مشترک دوفاز در آن،  $0 < \alpha < 1$  است. چون مقادیر  $\alpha$  در فاصله یک یا حداکثر دو سلول محاسباتی از صفر تا یک تغییر می‌کنند، کسر حجمی در عرض سطح مشترک با شیب تندی تغییر می‌کند. این مسئله منجر به ناحیه انتقالی باریکی برای خواص سیال محاسبه شده توسط رابطه (۱) می‌شود. با انتگرال‌گیری از معادله (۲) بر روی سلول محاسباتی و با استفاده از تعریف کسر حجمی، معادله بقا، که برای به‌روزرسانی میدان کسر حجمی حل می‌شود، به صورت زیر نتیجه گرفته می‌شود:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{1}{V} \int_S \underbrace{I(\mathbf{x}) \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}_s}_{\mathbf{u} \cdot \nabla \alpha} dS = \frac{1}{\rho_1} \dot{m} \delta_s \quad (4)$$

که  $S$  مرز سطح سلول و  $\mathbf{n}_s$  بردار نرمال واحد بر  $S$  است. معادله کسر حجمی تنها برای فاز مرجع حل می‌شود و کسر حجمی فاز دوم به راحتی با رابطه  $1 - \alpha$  معین می‌شود. عبارت جابه‌جایی در سمت چپ رابطه (۴)، که نشان‌دهنده پیچیده‌ترین بخش روش VOF است، شامل درون‌یابی تابع نشانگر روی صفحه‌های سلول محاسباتی بوده و باید با استفاده از یک الگوی درون‌یابی مناسب محاسبه شود [۱۶].

## معادلات حاکم

همان‌طور که بیان شد، روش حجم سیال یک مجموعه واحد از معادلات تکانه را توسط سیال‌ها، از طریق وزن‌دار کردن خواص سیال‌ها به کمک تابع کسر حجمی، به اشتراک گذاشته و از معادله کسر حجمی برای به‌دست‌آوردن سطح مشترک استفاده می‌کند. به منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی میدان جریان دوفازی داخل اتمایزر مایع هواده‌ی شده با نتایج تجربی لین و همکاران [۹]، از آب به عنوان فاز مایع و نیتروژن به عنوان فاز گازی برای شبیه‌سازی استفاده شده است. به دلیل بالا بودن عدد

1. Interface tracking  
2. Interface capturing

رینولدز و در نتیجه مغشوش‌بودن جریان دوفازی در داخل محفظه اختلاط و مجرای تخلیه اتمایزر مایع هواده‌ی شده، در شبیه‌سازی‌ها اثرات اغتشاشی نیز در نظر گرفته شده است. بنابراین، معادلات واحد پیوستگی و ناویر-استوکس متوسط‌گیری شده رینولدز به صورت زیر در سراسر دامنه محاسباتی حل می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [(\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_\sigma \quad (6)$$

که  $\mathbf{g}$  بردار شتاب گرانشی (در خلاف جهت محور  $Y$ )،  $\mathbf{F}_\sigma$  بردار نیروی کشش سطحی و  $\mu_T$  لزجت دینامیکی اغتشاشی است. خواص سیال شامل چگالی  $\rho$  و لزجت دینامیکی  $\mu$  به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_g \rho_g \quad (7)$$

$$\mu = \alpha_1 \mu_1 + \alpha_g \mu_g$$

که  $\alpha$  کسر حجمی، زیرنویس 1 مربوط به فاز مایع آب و زیرنویس  $g$  مربوط به فاز گازی نیتروژن است و در هر سلول محاسباتی  $\alpha_1 + \alpha_g = 1$ . برای مشخص کردن موقعیت سطح مشترک نیز باید معادله بقای کسر حجمی برای یکی از فازها حل شود. با توجه به اینکه بین فازها انتقال جرم وجود ندارد و در همه شبیه‌سازی‌ها فاز مایع به صورت تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است، معادله کسر حجمی به صورت زیر در میدان محاسباتی برای فاز مایع حل خواهد شد:

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \alpha_1 = 0 \quad (8)$$

نیروی کشش سطحی  $\mathbf{F}_\sigma$  نیز براساس روش استاندارد نیروی سطحی پیوسته<sup>1</sup> پیشنهادشده توسط برکبیل و همکاران [17] به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{F}_\sigma = \sigma \kappa \nabla \alpha, \quad \kappa = -\nabla \cdot (\nabla \alpha / |\nabla \alpha|) \quad (9)$$

که  $\kappa$  انحنای سطح و  $\sigma$  ضریب کشش سطحی است.

در شبیه‌سازی میدان جریان دوفازی داخل اتمایزر مایع هواده‌ی شده به دلیل بالا بودن سرعت فاز گازی اثر تراکم‌پذیری آن نیز در نظر گرفته شده است. بنابراین، معادله انرژی زیر نیز به معادلات حاکم اضافه می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot [\mathbf{u} (\rho E + p)] = \nabla \cdot [k_{\text{eff}} \nabla T] \quad (10)$$

$k_{\text{eff}}$  ضریب هدایت حرارتی مؤثر<sup>2</sup> دوفاز است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k_{\text{eff}} = \alpha_1 k_1 + \alpha_g k_g \quad (11)$$

همچنین، برای مدل کردن لزجت اغتشاشی،  $\mu_T$ ، نیز، با توجه به نتایج به دست آمده در شبیه‌سازی دوبعدی [11]، از مدل دو معادله‌ای  $k-\omega$  SST<sup>3</sup> استفاده شده است. بنابراین، باید دو معادله انرژی جنبشی اغتشاشی  $k$  و نرخ اتلاف ویژه  $\omega$  نیز به صورت زیر همراه با معادلات قبلی در نظر گرفته شوند:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{u}) = \nabla \cdot [\Gamma_k \nabla k] + G_k - Y_k \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \nabla \cdot (\rho \omega \mathbf{u}) = \nabla \cdot [\Gamma_\omega \nabla \omega] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (13)$$

که  $\Gamma_k$  و  $\Gamma_\omega$  به ترتیب نفوذپذیری مؤثر  $k$  و  $\omega$ ،  $G_k$  و  $G_\omega$  به ترتیب تولید  $k$  در اثر گرادیان سرعت متوسط و تولید  $\omega$ ،  $Y_k$  و  $Y_\omega$  به ترتیب اتلاف  $k$  و  $\omega$  در اثر اغتشاش و  $D_\omega$  نفوذ متقابل<sup>1</sup> است.

1. Continuum Surface Force  
2. Effective thermal conductivity  
3.  $k-\omega$  shear stress transport

## شبکه‌بندی، شرایط مرزی و روش حل

به‌منظور شبکه‌بندی بهتر میدان جریان داخل اتمایزر مایع هوادهی شده نوع یک لین و همکاران [۹]، که هندسه و ابعاد آن در بخش قبلی بیان و در شکل ۱ نشان داده شده است، این میدان به کمک نرم‌افزار دیزاین مدلر<sup>۲</sup> به ۹۸۴ حجم کوچک‌تر تقسیم شده است. تقسیم‌بندی میدان جریان داخل اتمایزر مایع هوادهی شده به‌همراه شرایط مرزی آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

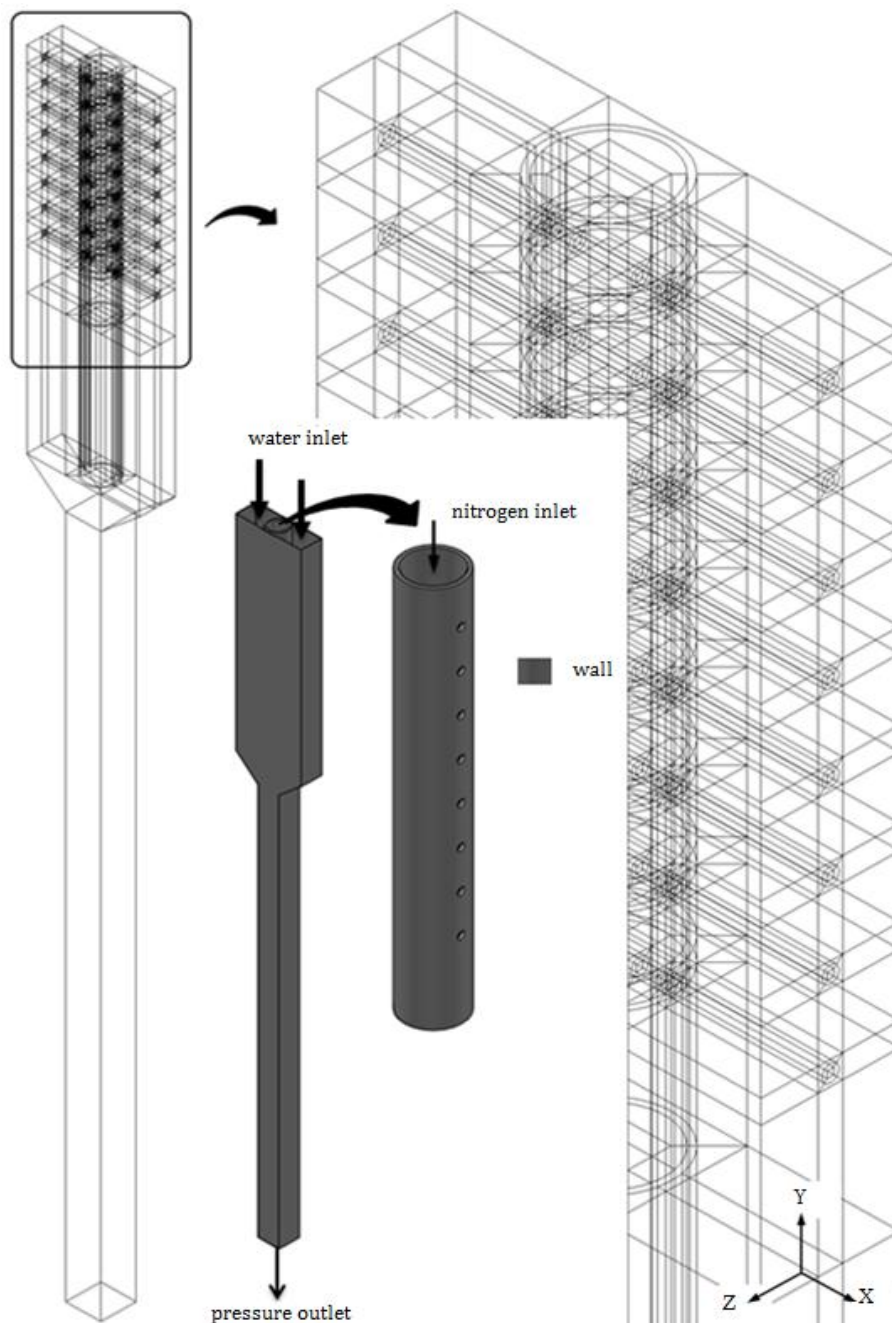


Figure 2- Internal flow field division of the effervescent atomizer along with its boundary conditions

شکل ۲- تقسیم بندی میدان جریان داخلی اتمایزر مایع هوادهی شده به‌همراه شرایط مرزی آن

1. Cross-diffusion
2. Design Modeler

شبکه‌بندی هندسه به کمک نرم‌افزار انسیس مشینگ<sup>۱</sup> مطابق شکل ۳ انجام شده است. همه حجم‌ها به جز حجم مربوط به بخش همگرای اتمایزر به صورت سازمان‌یافته<sup>۲</sup> شبکه‌بندی شده‌اند. در ورودی‌های آب و نیتروژن به اتمایزر به ترتیب شرط مرزی سرعت و دبی جرمی ثابت، در خروجی اتمایزر شرط مرزی فشار ثابت (فشار اتمسفریک) و در دیواره‌ها شرط عدم لغزش اعمال شده است. جدول ۱ سرعت آب ورودی و دبی جرمی نیتروژن ورودی به اتمایزر را در نسبت‌های هوادهی مختلف نشان می‌دهد. همچنین، در ابتدا فرض شده است که کل فضای داخل اتمایزر به جز لوله هوادهی توسط آب و لوله هوادهی توسط نیتروژن اشغال شده است. گاز نیتروژن به صورت گاز ایدئال و دمای اولیه فازها برابر ۲۹۸/۱۵ کلوین در نظر گرفته شده است. همچنین، دیواره‌ها به صورت عایق فرض شده‌اند.

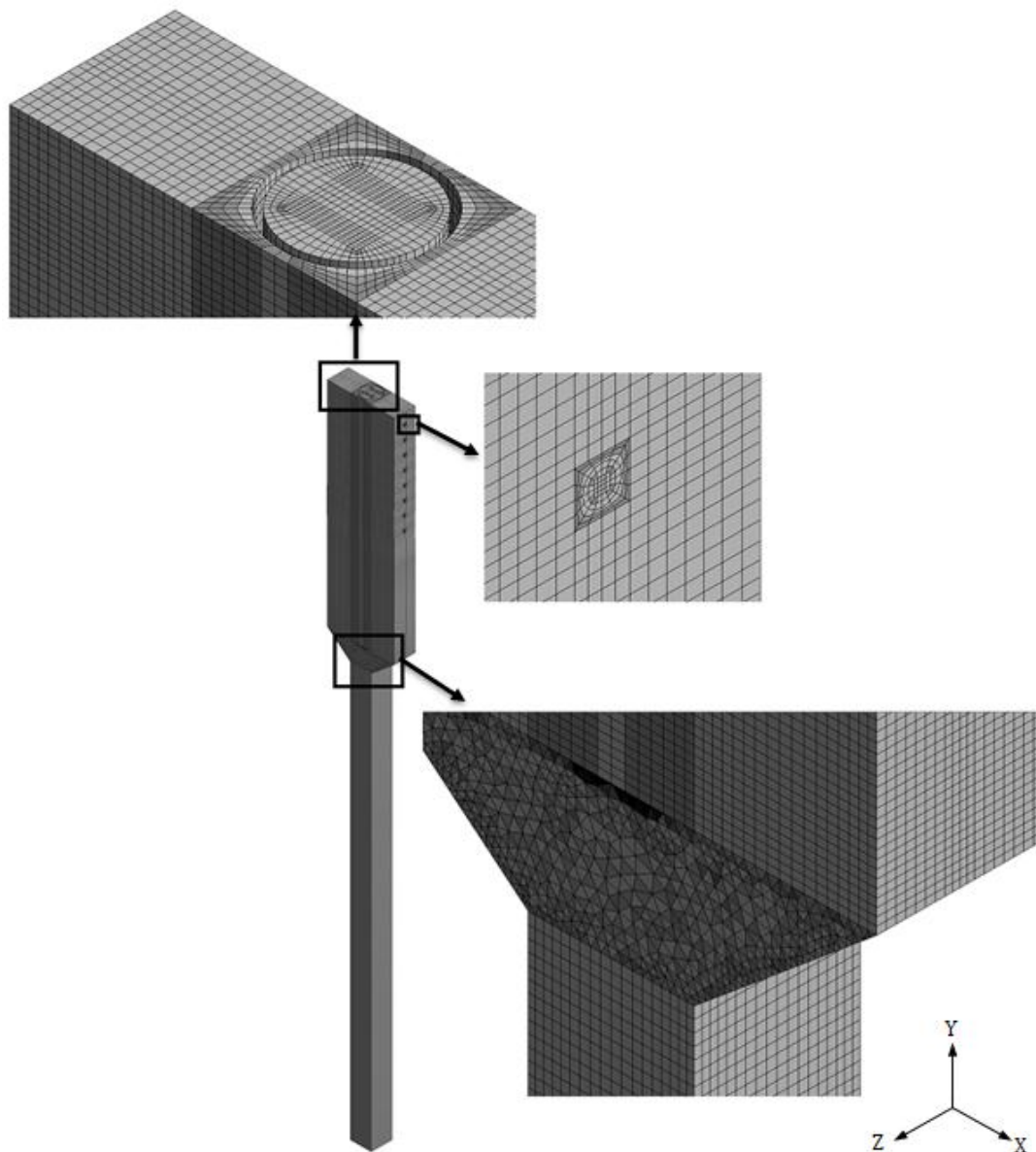


Figure 3- The meshing of the different parts of the effervescent atomizer using the ANSYS Meshing software

شکل ۳- شبکه‌بندی بخش‌های مختلف اتمایزر مایع هوادهی شده به کمک نرم‌افزار انسیس مشینگ

1. ANSYS Meshing
2. Mapped Mesh Type



جدول ۱- شرایط مرزی ورودی آب و نیتروژن در نسبت‌های هوادهی مختلف

Table 1- The boundary conditions of water and nitrogen inlet at different GLR values

GLR%	Water velocity (m/s)	Nitrogen mass flow rate (mg/s)
0.32	0.618	20.23
0.62	0.618	39.20
1.24	0.618	78.39

در کار حاضر، گسسته‌سازی و حل عددی معادلات حاکم بر مسئله به کمک نرم‌افزار انسیس فلونت و با دقت مضاعف<sup>۱</sup> انجام شده است. به دلیل ماهیت گذرای جریان، از حلگر فشار-مبنا<sup>۲</sup> با فرمول‌بندی گذرای ضمنی مرتبه اول<sup>۳</sup> استفاده شده است. ترم‌های جابه‌جایی مربوط به معادلات پیوستگی، تکانه، انرژی، انرژی جنبشی اغتشاشی و نرخ اتلاف ویژه با استفاده از الگوی پیشرو مرتبه دوم<sup>۴</sup>، به دلیل نفوذ عددی کمتر، گسسته شده‌اند. برای ترم جابه‌جایی مربوط به معادله کسر حجمی نیز از الگوی بازسازی هندسی<sup>۵</sup>، به دلیل تعقیب دقیق سطح مشترک استفاده شده است. برای جفت‌شدگی فشار-سرعت، الگوریتم قوی پیروز<sup>۶</sup> با یک مرحله تصحیح به کار رفته است. برای معادله کسر حجمی نیز از فرمولاسیون صریح<sup>۷</sup> استفاده شده است. باقیمانده حل برای معادله پیوستگی<sup>۴</sup> و برای سایر معادلات<sup>۶</sup> تنظیم شده است. با ثابت قراردادن عدد کورانت<sup>۸</sup> مساوی ۰/۲، مقادیر گام زمانی در هر مرحله برحسب بیشترین سرعت و کمترین طول ضلع سلول‌ها بین  $10^{-6}$  تا  $10^{-8}$  تغییر می‌کنند.

## ارائه و تحلیل نتایج

### بررسی استقلال از شبکه و اعتبارسنجی نتایج

بررسی استقلال از شبکه شبیه‌سازی جریان سه‌بعدی درون اتمایزر مایع هوادهی شده به کمک شبکه‌هایی با تعداد ۲۲۷۹۷۵، ۴۶۰۱۰۹ و ۸۹۹۵۵۶ سلول محاسباتی و در دبی مایع ۰/۳۸ لیتر در دقیقه و نسبت دبی جرمی گاز به مایع ۱/۲۴٪، منطبق بر شرایط جریانی آزمایش شده توسط لین و همکاران [۹] انجام شده است. بدین منظور، با توجه به گذرابودن حل، از میانگین سطحی کسر حجمی آب در چهار مقطع مختلف درون مجرای تخلیه اتمایزر مایع هوادهی شده روی بازه زمانی ۸ میلی‌ثانیه میانگین زمانی گرفته شده است. یکی از این مقاطع منطبق بر خروجی اتمایزر و سه مقطع دیگر به ترتیب به فاصله ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر در بالادست خروجی اتمایزر انتخاب شده است. نتایج این بررسی در نمودار شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکل ۴، نتایج متوسط زمانی میانگین سطحی کسر حجمی آب برای شبکه با تعداد ۴۶۰۱۰۹ سلول محاسباتی بر نتایج شبکه با تعداد ۸۹۹۵۵۶ سلول محاسباتی منطبق است. بنابراین، شبکه با تعداد ۴۶۰۱۰۹ سلول محاسباتی به‌عنوان شبکه مستقل برای شبیه‌سازی‌های بعدی جریان سه‌بعدی درون اتمایزر مایع هوادهی شده انتخاب شده است. برای اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده از شبکه مستقل، ضخامت فیلم مایع خارج‌شونده از اتمایزر مایع هوادهی شده برای نسبت‌های هوادهی مختلف محاسبه و با نتایج تجربی لین و همکاران [۹] مقایسه شده است. لین و همکاران [۹] برای ضخامت فیلم مایع خارج‌شونده از پنج نوع اتمایزر مایع هوادهی شده‌ای که مورد آزمایش قرار دادند به رابطه تجربی زیر رسیدند:

$$b = 0.18Q_G^{-0.62} \quad (14)$$

که  $b$  ضخامت فیلم مایع برحسب میلی‌متر در مقطعی از مجرای تخلیه است که ۳ میلی‌متر بالاتر از خروجی اتمایزر قرار دارد و  $Q_G$  دبی حجمی فاز گازی برحسب لیتر در دقیقه است.

1. Double Precision
2. Pressure-Based
3. First Order Implicit
4. Second Order Upwind
5. Geometrical reconstruction
6. Pressure Implicit with Splitting of Operator (PISO)
7. Explicit
8. Courant number

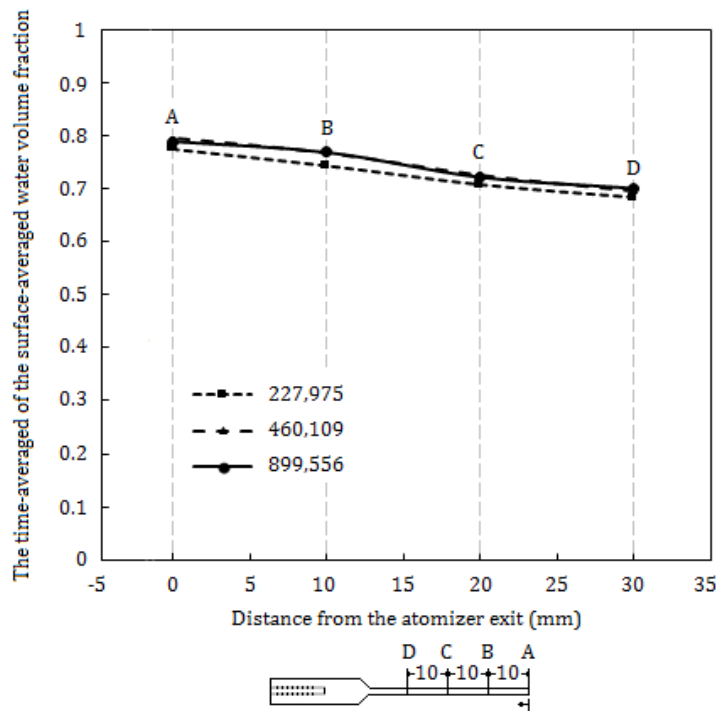


Figure 4- The time-averaged values of the surface-averaged water volume fraction at four different cross-sections inside the discharge passage of the effervescent atomizer for grids with different computational cells

شکل ۴- مقادیر متوسط زمانی میانگین سطحی کسر حجمی آب در چهار مقطع مختلف واقع در مجرای خروجی اتمایزر مایع هوادهی شده برای شبکه با تعداد سلول‌های محاسباتی مختلف

سطح فیلم مایع در مجرای تخلیه، به دلیل اختلاف سرعت بین مایع و گاز هوادهی، ثابت نبوده و به صورت موج‌دار است. لین و همکاران [۹] برای سهولت در اندازه‌گیری این ضخامت از ساختار موجی سطح فیلم مایع صرف‌نظر کرده و فرض کردند که گاز هوادهی درون یک مجرای استوانه‌ای با قطر ثابت جریان دارد. بدین منظور، آن‌ها ضخامت فیلم مایع را در ۳ میلی‌متر بالاتر از خروجی اتمایزر از صد تصویر سایه‌نگار<sup>۱</sup> جداگانه، برای کاهش عدم قطعیت حاصل از موج‌های سطحی، اندازه‌گیری کردند. آن‌ها همچنین از اثرات گوشه مجرای مربعی نازل صرف‌نظر کرده و برای معتبر بودن این فرض نسبت هوادهی را کمتر از ۰.۶٪ در نظر گرفتند.

با توجه به توضیحات داده‌شده، در شبیه‌سازی حاضر برای محاسبه ضخامت فیلم مایع در خط واقع بر مقطع طولی میانی و در ۳ میلی‌متر بالاتر از مجرای تخلیه از نصف میانگین طولی کسر حجمی آب در زمان‌های مختلف میانگین زمانی گرفته شده است. در نتیجه فرمول محاسبه ضخامت فیلم مایع به صورت زیر خواهد بود:

$$b = \frac{1}{2\Delta t} \sum_{j=1}^n \Delta t_j \left( \frac{\sum_{i=1}^m \alpha_i \Delta x_i}{2} \right) \quad (15)$$

که  $n$  تعداد گام‌های زمانی در بازه زمانی  $\Delta t$ ،  $m$  تعداد سلول‌های شبکه در مقطع مورد نظر از مجرای تخلیه،  $\Delta x_i$  المان طولی و  $\alpha_i$  کسر حجمی آب در سلول  $i$ ام است. با توجه به کوچک بودن گام‌های زمانی در شبیه‌سازی حاضر (از مرتبه  $10^{-8}$ )، نتایج شبیه‌سازی برای هر ۱۰۰۰ گام زمانی ذخیره شده است. بنابراین، مقدار  $n$  در رابطه (۱۵) برای هر نسبت هوادهی و با توجه به بازه زمانی در نظر گرفته‌شده برای متوسط‌گیری زمانی، مطابق جدول ۲ خواهد بود. همچنین، در شبکه‌بندی مربوط به شبیه‌سازی حاضر  $m=18$  است.

1. Shadwgraph

در کار لین و همکاران [۹] اطلاعاتی راجع به زمان شروع و طول بازه متوسط‌گیری آورده نشده است. با توجه به اینکه ضخامت فیلم مایع نسبت به زمان نوسان می‌کند، محاسبه اندازه ضخامت فیلم مایع در هر نسبت هوادهی وابسته به بازه زمانی است که روی آن متوسط‌گیری زمانی انجام می‌گیرد. به منظور کمتر شدن این وابستگی در شبیه‌سازی حاضر، در هر نسبت هوادهی به اندازه دو برابر مدت زمانی که لازم است گاز نیتروژن از محفظه اختلاط و مجرای خروجی عبور کرده و خود را به روزنه خروجی اتمایزر برساند به جریان دو فازی داخل اتمایزر مایع هوادهی شده اجازه داده شده که از روزنه تخلیه عبور کند. سپس، برای محاسبه ضخامت فیلم مایع خروجی از اتمایزر، از میانگین طولی کسر حجمی آب در ۳ میلی‌متر بالاتر از خروجی اتمایزر روی بازه زمانی مناسب، با توجه به مراجع [۱۳-۱۵]، مطابق جدول ۲، متوسط‌گیری زمانی انجام شده است. شکل ۵ نتایج این اعتبارسنجی را نشان می‌دهد.

جدول ۲- زمان خروج گاز نیتروژن از روزنه تخلیه، بازه زمانی و تعداد گام‌های زمانی مورد نظر برای محاسبه ضخامت فیلم مایع خروجی از اتمایزر مایع هوادهی شده نوع یک لین و همکاران [۹] در نسبت‌های هوادهی مختلف

Table 1- The exit time of Nitrogen gas, the interval time and number of time steps to calculate the liquid film thickness exiting from the outlet of Lin et al [9] I-type effervescent atomizer at different GLR values

GLR%	exit time of Nitrogen (ms)	Averaging time interval (ms) (at present work)	Number of time steps (n)
0.32	8.6	17.2-23.2	48
0.62	6.7	13.4-15.4	27
1.24	5.2	10.4-11.4	21

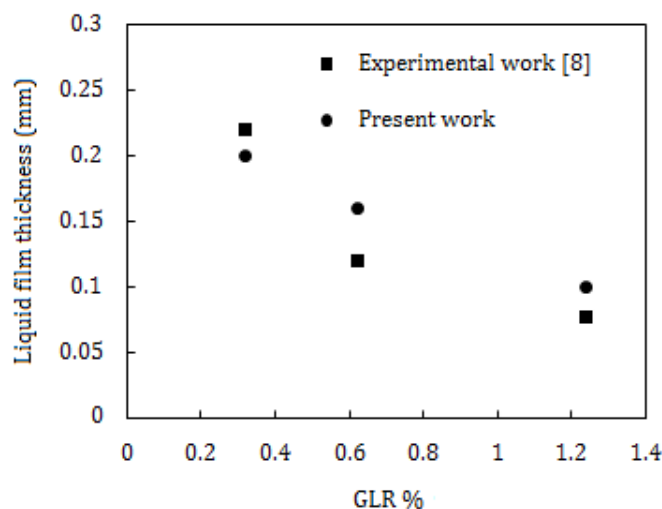


Figure 5- The liquid film thickness computed from the present simulation results at 3 mm upstream of the effervescent atomizer outlet for different aeration ratios compared with the Lin et al. [9] measuring results

شکل ۵- ضخامت فیلم مایع به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی حاضر در ۳ میلی‌متر بالاتر از خروجی اتمایزر مایع هوادهی شده برای نسبت‌های هوادهی مختلف در مقایسه با نتایج اندازه‌گیری شده توسط لین و همکاران [۹]

با توجه به نمودار شکل ۵ و با مقایسه نتایج کار حاضر با نتایج تجربی، مشاهده می‌شود که ضخامت فیلم مایع به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی در خروجی اتمایزر مایع هوادهی شده دارای روندی مشابه با تغییرات به دست آمده از نتایج تجربی برای این ضخامت است. همچنین، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی سه‌بعدی حاضر دارای حداکثر خطای نسبی ۳۳/۳۳٪ هستند که با توجه به ماهیت دوفازی و گذرابودن جریان شبیه‌سازی شده، نشان‌دهنده مناسب بودن مدل‌های به کار گرفته شده است.

### رژیم جریان دوفازی درون مجرای تخلیه اتمایزر مایع هوادهی شده

براساس آزمایش‌های تجربی لین و همکاران [۹] شبیه‌سازی سه‌بعدی میدان جریان دوفازی درون اتمایزر مایع هوادهی شده در دبی مایع ۰/۳۸ لیتر در دقیقه و نسبت‌های دبی جرمی گاز به مایع مختلف ۰/۳۲٪، ۰/۶۲٪ و ۱/۲۴٪ انجام شده است که در این بخش نتایج آن ارائه و بررسی می‌شود.

شکل ۶ کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن و سرعت در صفحه طولی میانی ( $Z=0$ ) مجرای تخلیه اتمایزر مایع هوادهی شده را برای نسبت‌های هوادهی مختلف در کنار هم نشان می‌دهد.

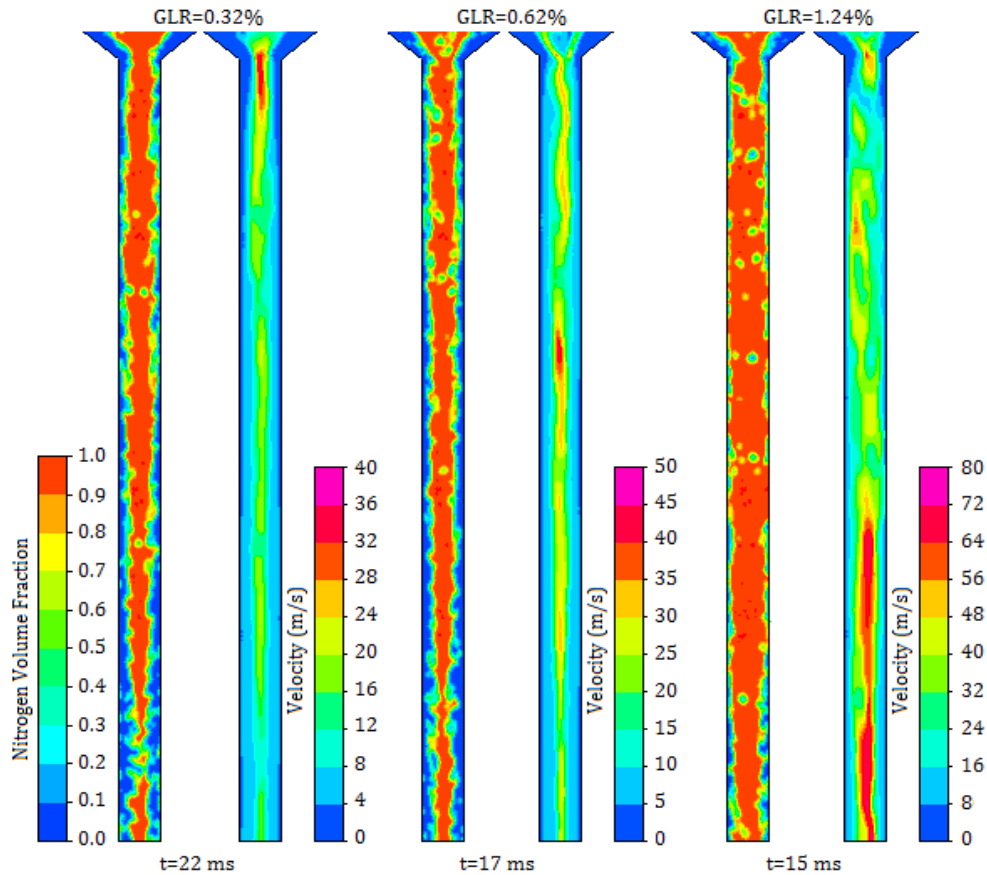


Figure 6- Counters of nitrogen volume fraction and velocity within the middle surface across the length of the discharge passage of the effervescent atomizer at different aeration ratios

شکل ۶- کانتورهای کسر حجمی نیتروژن و سرعت در صفحه طولی میانی مجرای تخلیه اتمایزر مایع هوادهی شده در نسبت‌های هوادهی مختلف

براساس کانتورهای کسر حجمی نیتروژن در شکل ۶، برای هر سه نسبت هوادهی، رژیم جریان دوفازی درون مجرای تخلیه به صورت حلقوی بوده و همان‌طور که در نمودار شکل ۵ نیز نشان داده شد، با افزایش مقدار هوادهی، ضخامت فیلم مایع در مجرا کاهش یافته است. با در نظر گرفتن هم‌زمان کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن و سرعت در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت هوادهی سرعت هسته گازی در جریان حلقوی درون مجرای تخلیه افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت هسته گازی، فشار درون مجرا کاهش یافته و در نتیجه، به دلیل چگالی کمتر گاز، این فاز کسر حجمی بیشتری را در داخل مجرا به خود اختصاص می‌دهد. بنابراین، کسر حجمی و ضخامت فیلم مایع در مجرا کاهش پیدا می‌کند. با کاهش ضخامت فیلم مایع و با توجه به ثابت بودن دبی مایع در هر سه نسبت هوادهی، سرعت فیلم مایع نیز افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در هر سه نسبت هوادهی هنگام ورود جریان دوفازی از قسمت همگرای محفظه اختلاط به درون مجرای تخلیه، با توجه به کاهش سطح مقطع جریان، سرعت هر دو فاز مایع و گاز افزایش می‌یابد. فاز گازی به دلیل چگالی کمتر شتاب بیشتری گرفته و سطح مقطع بیشتری از مجرا را به خود اختصاص می‌دهد، به طوری که فاز مایع به صورت یک فیلم ناپایدار در اطراف دیواره مجرا و فاز گازی در هسته آن قرار می‌گیرد. به سمت پایین دست مجرا، به خصوص در نسبت‌های دبی جرمی گاز به مایع پایین‌تر، که ضخامت فیلم مایع تشکیل شده در آن‌ها بیشتر است، به دلیل تنش برشی ناشی از اختلاف سرعت بین دو فاز در سطح فیلم مایع، بخش‌هایی از فیلم مایع توسط فاز گازی در اثر ناپایداری کلوین-هلمهولتز<sup>۱</sup> به درون هسته گازی کشیده می‌شود.

فیلم مایع ناپایدار (دارای امواجی در سطح مشترک آن) به روش‌های مختلفی می‌تواند به داخل جریان گازی کشیده شود. در جریان حلقوی، مهم‌ترین مکانیزمی که به کمک آن فیلم مایع به درون جریان گازی کشیده می‌شود مکانیزم جداکردن قطرات از موج چرخشی<sup>۲</sup> است [۱۸]. فیلم مایع ناپایدار در نزدیکی دیواره تحت تأثیر نیروی پسای ناشی از تنش برشی بین دو فاز و نیروی کشش سطحی قرار می‌گیرد. موج ایجاد شده در سطح مشترک دو فاز به کمک نیروی پسا به صورت لیگامنت<sup>۳</sup> به درون جریان گاز کشیده می‌شود. با افزایش سرعت فاز گازی در مقایسه با فاز مایع (در نسبت‌های هوادهی بالاتر)، تنش برشی ایجاد شده در سطح مشترک باعث ایجاد نیروی پسایی می‌شود که بر نیروی کشش سطحی غلبه کرده و قطراتی از مایع را از قله موج ناپایدار کشیده شده جدا می‌کند. قطرات جدا شده از قله موج خود درون جریان گازی و تحت تأثیر نیروهای پسا<sup>۴</sup> و کشش سطحی ممکن است به قطرات کوچک‌تر تقسیم شود. شکل ۶ ناپایداری فیلم مایع در مجرای تخلیه و جدا شدن لیگامنت‌ها و قطرات از سطح آن در همه نسبت‌های هوادهی را به کمک مکانیزم توضیح داده شده به خوبی نشان می‌دهد. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت هوادهی و در نتیجه افزایش سرعت برشی بین گاز و مایع، تعداد قطرات بیشتری به درون هسته گازی کشیده می‌شوند، به طوری که رژیم جریان به صورتی در می‌آید که در کناره دیواره‌ها ورقه نازک مایع و درون هسته گازی قطرات پراکنده مایع جریان خواهد داشت. در ادامه، به کمک رسم کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن با گذشت زمان در صفحه طولی میانی مجرای تخلیه اتمایزر، جزئیات جریان دوفازی درون این مجرا و ضخامت فیلم مایع خروجی از آن در هر نسبت هوادهی بیشتر توضیح داده می‌شود.

در نسبت دبی جرمی گاز به مایع ۰/۳۲٪، همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، پس از ورود جریان دوفازی به درون مجرای تخلیه، در ابتدا، به دلیل تخلیه حجم مایع موجود در محفظه اختلاط توسط فاز گازی با فشار بالاتر، لخته‌هایی از مایع در این مجرا مشاهده می‌شود (در زمان ۱۰ میلی ثانیه). مشابه چنین لخته‌هایی در آزمایش تجربی لین و همکاران [۹] نیز مشاهده شده است.

با توجه به کانتورهای کسر حجمی نیتروژن در شکل ۷، بعد از زمان ۱۲ میلی ثانیه رژیم جریان درون مجرای تخلیه به صورت رژیم حلقوی در می‌آید. به دلیل پایین بودن دبی گاز در این نسبت هوادهی، فاز مایع با فشار گاز نیتروژن به صورت متناوب از قسمت همگرای محفظه اختلاط به درون مجرای خروجی تخلیه می‌شود. بنابراین، همان‌طور که در زمان‌های ۱۶ میلی ثانیه و ۲۲ میلی ثانیه کاملاً مشخص است ضخامت فیلم مایع درون مجرای تخلیه به صورت تناوبی کم و زیاد می‌شود. ضخامت زیاد فیلم مایع درون مجرای تخلیه و نوسانات شدید آن می‌تواند باعث شود که علی‌رغم غالب بودن رژیم جریان حلقوی در بیشتر زمان‌ها، در بعضی از زمان‌ها نیز، همانند زمان ۱۰ یا ۱۲ میلی ثانیه در شکل ۷، همچنان احتمال تشکیل لخته‌های مایع مخلوط شده با فاز گاز در بعضی از نقاط درون مجرا وجود داشته باشد.

1. Kelvin-Helmholtz  
2. Roll-wave  
3. Ligament  
4. drag

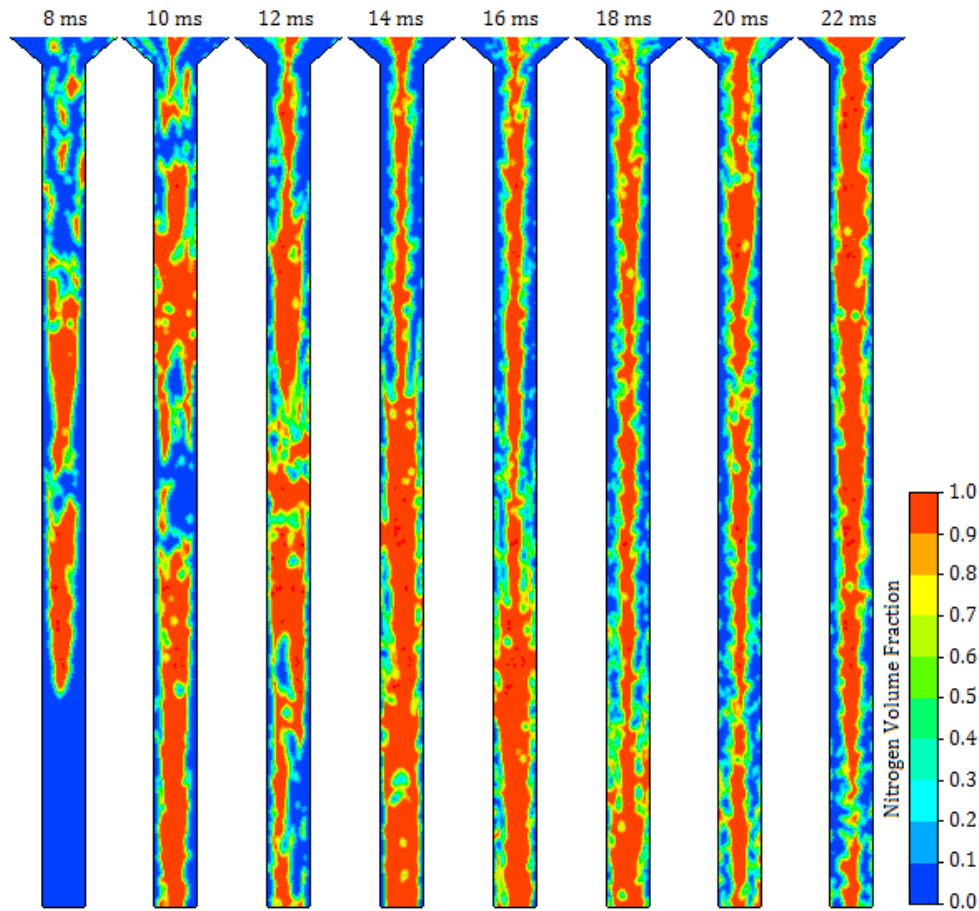


Figure 7- Counters of nitrogen volume fraction within the middle surface across the length of the discharge passage of the effervescent atomizer at different times in  $G_{LR}=0.32\%$

شکل ۷- کانتورهای کسر حجمی نیتروژن در صفحه طولی میانی مجرای تخلیه اتمایزر مایع هوادهی شده در زمان‌های مختلف برای نسبت هوادهی ۰/۳۲٪

با افزایش نسبت هوادهی به مقدار ۰/۶۲٪، همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، با خارج شدن گاز نیتروژن از خروجی اتمایزر بعد از گذشت زمان ۸ میلی‌ثانیه رژیم جریان درون مجرای تخلیه به صورت کاملاً حلقوی در می‌آید. تغییرات ضخامت فیلم مایع در مجرای تخلیه به کمک کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن در این نسبت هوادهی نیز قابل تشخیص است.

رژیم جریان حلقوی درون مجرای تخلیه، به دلیل عدم حضور لخته‌های مایع و بنابراین عدم تغییرات شدید در اندازه قطرات اسپری حاصل، به عنوان یک رژیم مطلوب در اتمی‌زاسیون مایع هوادهی شده محسوب می‌شود [۱۹]. با توجه به شکل‌های ۷ و ۸، شبیه‌سازی سه‌بعدی اتمایزر مایع هوادهی شده نوع یک لاین و همکاران [۹] در نسبت دبی جرمی گاز به مایع ۰/۳۲٪ و ۰/۶۲٪ نشان‌دهنده وجود رژیم جریان حلقوی درون مجرای تخلیه (بعد از گذشت زمان مناسب) است. اما، کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن در این شکل‌ها در زمان‌های مختلف نشان‌دهنده تغییرات ضخامت فیلم مایع در رژیم جریان حلقوی درون مجرای تخلیه در این نسبت‌های هوادهی است. این تغییرات محسوس در ضخامت بالای فیلم مایع، علاوه بر اینکه احتمال تشکیل لخته‌های مایع را بالا می‌برد، منجر به تغییرات محسوس در اندازه قطرات اسپری حاصل در روزه تخلیه نیز خواهد شد.

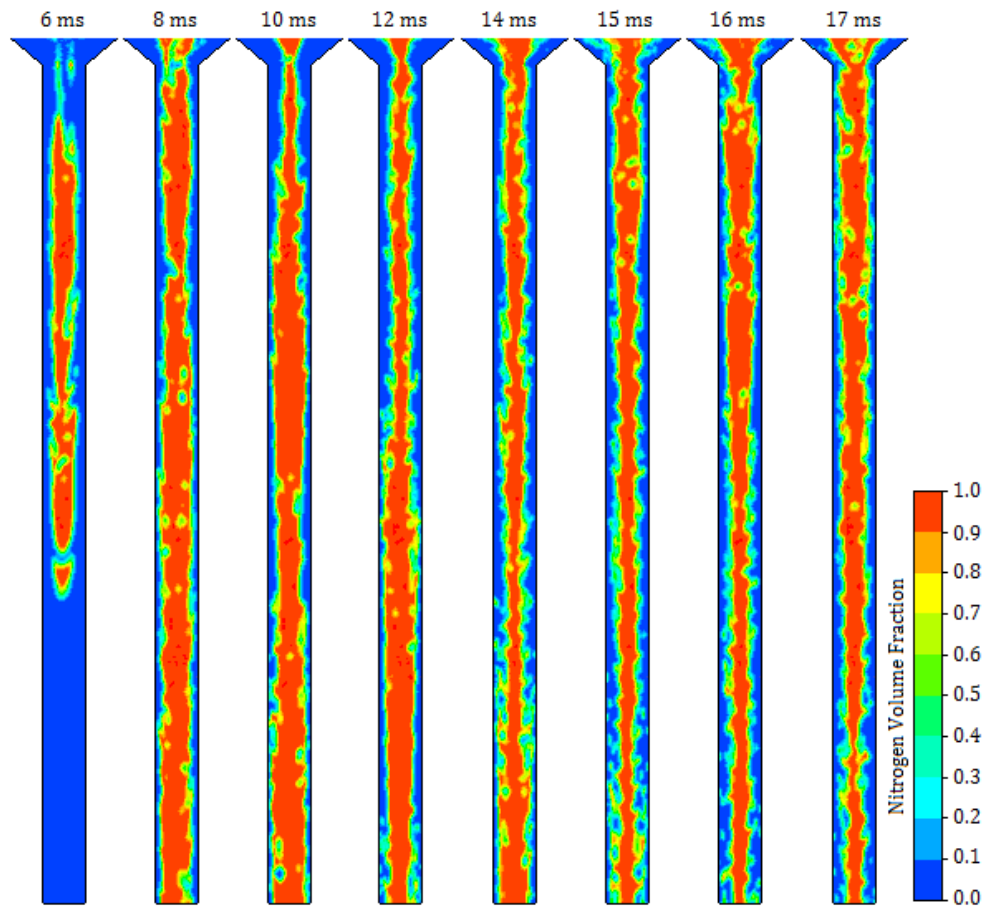


Figure 8- Countors of nitrogen volume fraction within the middle surface across the length of the effervescent atomizer at different times in GLR=0.62%

شکل ۸- کانتورهای کسر حجمی نیتروژن در صفحه طولی میانی اتمایزر مایع هوادهی شده در زمان های مختلف برای نسبت هوادهی ۰/۶۲٪

با افزایش بیشتر نسبت هوادهی به ۱/۲۴٪ کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن در صفحه طولی میانی مجرای تخلیه اتمایزر مایع هوادهی شده شبیه سازی شده در زمان های مختلف به صورت شکل ۹ در می آید. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، با گذشت زمان در این نسبت هوادهی، تقریباً کل مجرای تخلیه توسط گاز نیتروژن اشغال شده و فاز مایع تنها به صورت یک فیلم بسیار نازک در اطراف دیواره ها و قطرات پراکنده در هسته گازی قابل مشاهده است. در نتیجه، جریان حلقوی با ضخامت بسیار کم فیلم مایع در این مجرا جریان خواهد داشت. آزمایش های تجربی لین و همکاران [۹] نیز در نسبت دبی جرمی گاز به مایع ۱/۲۴٪ نشان دهنده رژیم جریان حلقوی مغشوش درون مجرای تخلیه بوده است.

با توجه به توضیحات داده شده و با توجه به کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن در شکل های ۷ تا ۹، می توان گفت که در همه نسبت های هوادهی مورد بررسی (۰/۳۲٪، ۰/۶۲٪ و ۱/۲۴٪) رژیم جریان دوفازی غالب درون مجرای تخلیه اتمایزر شبیه سازی شده به صورت رژیم جریان حلقوی است، اما در نسبت های هوادهی پایین تر (۰/۳۲٪ و ۰/۶۲٪)، به دلیل ضخامت بیشتر فیلم مایع و تغییرات شدید آن، احتمال تشکیل لخته های مایع در بعضی از زمان ها نیز وجود دارد. همچنین، با افزایش میزان هوادهی علاوه بر کاهش ضخامت فیلم مایع در مجرای تخلیه، تغییرات ضخامت فیلم مایع در این مجرا نیز کمتر می شود. از این رو، قابل پیش بینی است که با افزایش میزان هوادهی و کاهش ضخامت فیلم مایع و تغییرات آن در خروجی اتمایزر اندازه متوسط قطرات اسپری حاصل نیز ریزتر و یکنواخت تر شود.

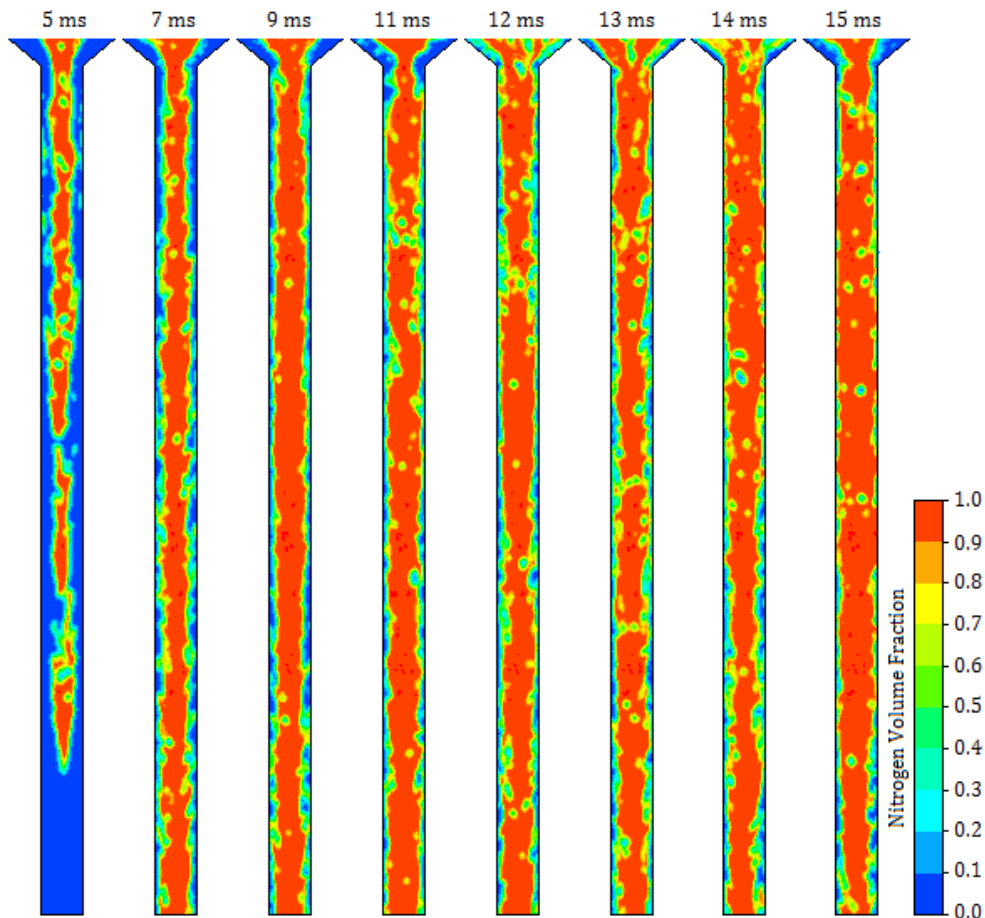


Figure 9- Counters of nitrogen volume fraction within the middle surface across the length of the effervescent atomizer at different times in GLR=1.24%

شکل ۹- کانتورهای کسر حجمی نیتروژن در صفحه طولی میانی اتمایزر مایع هواده‌ی شده در زمان‌های مختلف برای نسبت هواده‌ی ۱/۲۴٪

### نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، برای اولین بار جریان دوفازی سه‌بعدی در بالادست روزنه تخلیه اتمایزر مایع هواده‌ی شده نوع یک آزمایش‌شده توسط لین و همکاران [۹] به صورت عددی مطالعه شده است. این اتمایزر دارای لوله هواده‌ی با دو ردیف هشت‌تایی سوراخ هواده است که به دلیل زیادتربودن سوراخ‌های هواده‌ی (نسبت به انواع دیگر مورد آزمایش) فاز گازی و فاز مایع در درون اتمایزر و در محفظه اختلاط آن بهتر مخلوط شده و در اندازه محفظه اختلاط کوتاه‌تر جریان دوفازی همگن‌تری را ایجاد می‌کند. آب با دبی ۰/۳۸ لیتر در دقیقه به‌عنوان فاز مایع و گاز نیتروژن با دبی‌های مختلف و متناسب با نسبت‌های دبی جرمی گاز به مایع ۰/۳۲٪، ۰/۶۲٪ و ۱/۲۴٪ به‌عنوان فاز گازی، منطبق بر آزمایش‌های لین و همکاران [۹]، در نظر گرفته شده است. اثر تراکم‌پذیری گاز هواده نیتروژن نیز در همه نسبت‌های هواده‌ی، به دلیل سرعت بالای این گاز در روزنه‌های خروجی لوله هواده‌ی، لحاظ شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در همه نسبت‌های هواده‌ی مورد بررسی رژیم جریان دوفازی غالب در داخل مجرای تخلیه به صورت رژیم جریان حلقوی است. با توجه به کانتورهای کسر حجمی گاز نیتروژن درون مجرای تخلیه اتمایزر و در زمان‌های مختلف مشاهده شد که با افزایش نسبت دبی جرمی گاز به مایع به مقدار ۱/۲۴٪، علاوه بر کاهش ضخامت فیلم مایع در مجرای تخلیه اتمایزر مایع هواده‌ی شده، تغییرات در ضخامت این فیلم نیز کاهش می‌یابد. بنابراین،



افزایش نسبت هوادهی از یک طرف باعث کاهش ضخامت فیلم مایع جریان حلقوی در مجرای تخلیه شده که منجر به ریزتر شدن قطرات اسپری حاصل می‌شود و از طرف دیگر باعث کاهش تغییرات ضخامت فیلم مایع در این مجرا می‌شود که یکنواخت‌تر شدن اندازه قطرات اسپری حاصل را به دنبال خواهد داشت.

## منابع

1. P. B. Bai, Y. M. Xing and Z. Wang, "Experiment Study and Simulation Research for the Atomization Characteristics of the Internal-Mixing Twin-Fluid Atomizer," in *Advanced Materials Research*, 1049, 2014, pp. 1075-1082.
2. S. Sovani, P. Sojka and A. Lefebvre, "Effervescent atomization," *Progress in energy and combustion science*, 24, No. 4, 2001, pp. 483-521.
3. L. Qian and J. Lin, "Modeling on effervescent atomization: A review. Science China Physics," *Mechanics and Astronomy*, 54, No. 12, 2011, pp. 2109-2129.
4. H. Lefebvre and R. Ballal, *GAS Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*, Third Edition, CRC press, Boca Raton, 2010.
5. M. Zaremba, J. Kozák, M. Malý, L. Weiß, P. Rudolf, J. Jedelský and M. Jícha, "An experimental analysis of the spraying processes in improved design of effervescent atomizer," *International Journal of Multiphase Flow*, 103, 2018, pp. 1-15.
6. U. Sarkar and K. Ramamurthi, "Flow visualization of sprays formed by bubbly, slug, and annular flows in an effervescent atomizer," *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 14, No. 4, 2007.
7. M. Lorcher, F. Schmidt and D. Mewes, "Effervescent atomization of liquids," *Atomization and Sprays*, 15, No. 2, 2005.
8. J.Y. Kim and S.Y. Lee, "Dependence of spraying performance on the internal flow pattern in effervescent atomizers," *Atomization and Sprays*, 11, No. 6, 2001, pp. 735-756.
9. K. C. Lin, P. Kennedy and T. Jackson, "Structures of internal flow and the corresponding spray for aerated-liquid injectors," *37th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Salt Lake City, UT, USA, 8-11 July, 2001, pp. 3569.
10. M. Tian, J. Edwards, K. C. Lin and T. Jackson, "Numerical simulation of transient two-phase flow with aerated liquid injectors. Part 2: flow structure," *33rd AIAA fluid dynamics conference and exhibit*, Orlando, Florida, 23-26 June, 2003, pp. 4266.
11. Z. AlizadehKaklar and M. R. Ansari, "Numerical simulation of two-phase flow within an effervescent atomizer using volume of fluid model," *Modares Mechanical Engineering*, 17, No. 7, 2017, pp. 59-67. (in Persian)
12. Z. A. Kaklar and M. R. Ansari, "Numerical analysis of the internal flow and the mixing chamber length effects on the liquid film thickness exiting from the effervescent atomizer," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135, No. 3, 2019, pp. 1881-1890.
13. S. A. Esfarjani and A. Dolatabadi, "A 3D simulation of two-phase flow in an effervescent atomizer for suspension plasma spray," *Surface and Coatings Technology*, 203, No. 15, pp. 2074-2080.
14. K. Mehmood and J. Masud, "Analysis of two-phase flow in an effervescent atomizer using volume of fluid method," *50th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition*, Nashville, Tennessee, 9-12 January, 2012, pp. 312.
15. A. Helmy, S. Wilson, A. Siam and A. Balabel, "Numerical modeling of two-phase flow in an effervescent atomizer using volume of fluid method," *International Journal of Modern Physics and Applications*, 1, No. 4, 2015, pp. 186-192.
16. J. R. Thome and J. Kim, *Encyclopedia of Two-Phase Heat Transfer and Flow II Special Topics and Applications Volume 4: Numerical Modeling of Two-Phase Flow and Heat Transfer*, World Scientific Publishing Company, 2015.
17. J. U. Brackbill, D. B. Kothe and C. Zemach, "A continuum method for modeling surface tension," *Journal of computational physics*, 100, No. 2, 1992, pp. 335-354.
18. I. Kataoka, M. Ishii and K. Mishima, "Generation and size distribution of droplet in annular two-phase flow," *Trasaction of the ASME 105*, 1983, pp.230-238.
19. J. Jedelsky and M. Jicha, "Unsteadiness in effervescent sprays: a new evaluation method and the influence of operational conditions," *Atomization and Sprays*, 18, No. 1, 2008, pp. 49-83.

English Abstract

## Numerical study of the 3D internal flow field in the discharge passage of effervescent atomizer at different aeration levels

Zahra Alizadeh Kaklar<sup>1</sup> and MohamadReza Ansari<sup>2\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, TarbiatModares University, Tehran, Iran, z.alizadehkaklar@modares.ac.ir

2- Department of Mechanical Engineering, TarbiatModares University, Tehran, Iran, mra\_1330@modares.ac.ir

\*Corresponding author

(Received: 2020.09.1, Received in revised form: 2020.09.13, Accepted: 2020.09.28)

Two-phase flow field upstream of the discharge orifice of effervescent atomizer has been numerically studied at 0.38 L/min liquid flow rate and different gas to liquid mass ratios of 0.32%, 0.62%, and 1.24%. The internal flow of the atomizer has been three-dimensionally simulated using the volume of fluid method. Aeration gas is considered as an ideal gas at all aeration levels due to the high velocity of it at the exit of the aerating tube. At any aeration level, the simulation results have been represented by the contours of nitrogen volume fraction at different times and the contours of velocity. At all considered aeration levels, according to experimental results, the contours of nitrogen volume fraction show the annular flow regime is dominant in the discharge passage of the simulated atomizer. Also, by increasing the aeration level, both the liquid film thickness in the discharge passage and its change along the passage will be decreased. Therefore, it can be expected the spray of the effervescent atomizer at high aeration levels be finer due to a reduction of the liquid film thickness in the discharge passage and more uniform due to fewer changes in the liquid film thickness in this passage.

**Keywords:** Effervescent atomizer, Two-phase flow, Gas-Liquid ratio (GLR), Volume of fluid (VOF) method