

بررسی تجربی و عددی تأثیر شرایط جریان‌ی و هندسی اتمایزر هوا - ورزش بر مشخصات اسپری

مازیار شفایی روشنی^۱، سجاد محمودزاده^۲، آرمین آبدیه کیخا^۳

۱ استادیار، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، mshafae@ut.ac.ir

۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

۳ دانشجوی دکتری، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۱۲

چکیده

در مقاله حاضر مطالعه‌ای آزمایشگاهی به همراه شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار اوپن‌فوم برای بررسی آثار شرایط جریان‌ی و هندسی اتمایزر بر مشخصات اسپری تولیدشده روی یک اتمایزر دوسیاله هوا - ورزش انجام شده است. در مطالعه آزمایشگاهی قطر میانگین ساوتر قطرات توسط سامانه لیزری مالورن برای اعداد وبر در محدوده ۷۲۷ تا ۲۲۵۰، رینولدز مایع ۱۶۵۰ و برای چهار قطر تزریق مختلف اندازه‌گیری شده است. شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش ردیابی ذرات گسسته بر مبنای رهیافت اولیری - لاگرانژی انجام شده است. در شبیه‌سازی عددی به منظور مدل‌سازی شکست اولیه جت مایع از توزیع روزین راملر و برای شکست ثانویه نیز از مدل کلوین هلمهولتز - رایلی تیلور استفاده شده است. نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد در یک وبر مشخص افزایش قطر تزریق مایع باعث افزایش قطر میانگین ساوتر شده و در اعداد وبر بالا تأثیر قطر تزریق بر قطر میانگین ساوتر کاهش می‌یابد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد پارامترهای هندسی طول اختلاط گاز مایع و زاویه تزریق مایع تأثیر ناچیزی بر عمق نفوذ اسپری دارد؛ در حالی که قطر تزریق مایع تأثیر قابل‌توجهی بر این مشخصه اسپری می‌گذارد و با افزایش آن، عمق نفوذ اسپری کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی

اتمایزر هوا - ورزش، اوپن فوم، قطر میانگین ساوتر، عدد وبر، سامانه لیزری مالورن

۱. مقدمه

تبدیل می‌شود. وسیله‌ای که به منظور اتمیزه کردن سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد، اتمایزر نامیده می‌شود. فرایند اتمیزاسیون یا

اسپری یا اتمیزاسیون به اصطلاحاً فرایندی گفته می‌شود که طی آن توده سیال با عبور از یک نازل به اسپری قطرات کوچک

اسپری مایعات کاربردهای فروانی در صنایع مختلف از جمله کشاورزی، پزشکی و مهندسی دارد که یکی از مهم‌ترین کاربردهای آن پاشش سوخت در محفظه احتراق موتورهای توربین گازی و احتراق داخلی است. بازده احتراق و میزان آلاینده‌ی مربوط به آن به شدت تحت تأثیر اتمیزاسیون سوخت، تبخیر قطرات و اختلاط آن با هواست. دینامیک اسپری و مشخصات آن در بررسی پایداری شعله، ایمنی، بازده انرژی تولیدی و سازوکارهای ایجاد آلودگی بسیار حائز اهمیت است. امروزه درک و کنترل فرایند اسپری و احتراق آن نیازی اساسی در راستای افزایش بازده احتراق و کاهش آلاینده‌ی‌های مربوط به آن است [۱]. اختلاف سرعت بین فاز گاز و مایع، عامل اصلی ایجاد اسپری در بیشتر اتمایزرهاست. اتمایزرها براساس سازوکار ایجاد اختلاف سرعت به انواع مختلفی دسته‌بندی می‌شوند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به اتمایزرهای فشاری و اتمایزرهای دوسیاله اشاره کرد. در اتمایزرهای فشاری مایع با سرعت بسیار زیاد در محیط گازی تقریباً ساکن (معمولاً هوا) نسبت به فاز مایع تخلیه می‌شود. یک روش جایگزین برای دستیابی به اختلاف سرعت بین این دو فاز، تزریق مایع با سرعت پایین در یک جریان گازی پرسرعت است. به اتمایزرهایی که از این سازوکار به‌منظور اسپری مایع استفاده می‌کنند، اتمایزرهای دوسیاله گفته می‌شود. در این نوع اتمایزرها جهت بهبود کیفیت اتمیزاسیون و اختلاط مناسب سوخت و اکسند (هوا) از یک جریان گاز پرسرعت، هم‌محور یا متقاطع با جریان سوخت تزریقی استفاده می‌شود. افت فشار پایین تزریق مایع، اتمیزاسیون بهتر، اسپری با قطر قطرات پایین، احتراق کامل و در نهایت آلاینده‌ی کمتر ناشی از احتراق، از مزایای این نوع اتمایزرهاست.

اتمایزرهای دوسیاله به دو نوع هوا - کمک^۱ و هوا - ورزش^۲ تقسیم‌بندی می‌شوند. در هر دو نوع این اتمایزرها، حجم مایعی که بایستی اسپری شود به حالت جت مایع با سرعت نسبتاً پایین در معرض جریان پرسرعت گاز قرار می‌گیرد. از انرژی جنبشی جریان گاز پرسرعت برای جدا کردن رباط از جت مایع و تولید قطرات ریز استفاده می‌شود. تفاوت اصلی بین اتمایزرهای هوا - ورزش و هوا - کمک در میزان دبی جرمی جریان هوا می‌باشد. در نوع هوا - کمک نرخ جریان جرمی جریان هوا در مقایسه با اتمایزرهای هوا - ورزش کمتر می‌باشد که این امر با افزایش سرعت جریان هوا در این اتمایزرها جبران می‌شود. در اتمایزرهای هوا - کمک جریان

هوا با نرخ جریان جرمی اندک و سرعت زیاد استفاده می‌شود در حالی‌که در اتمایزرهای هوا - ورزش جریان گاز با سرعت کمتری مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲].

یکی از مهم‌ترین کاربردهای اتمایزرهای دوسیاله گاز - مایع مربوط به موشک‌های سوخت مایع سیکل بسته است. در موتورهای سیکل بسته گاز داغ خروجی از مولد گاز با عبور از یک توربین مورد استفاده قرار داد. در این حالت توربین امکان فشرده‌سازی گاز اکسیدکننده و همچنین با فعال کردن پمپ امکان جریان یافتن مایع را به انژکتور فراهم می‌سازد. زاویه مخروطی اسپری، قطر میانگین ساوتر^۳ قطرات و عمق نفوذ مشخصه‌های اصلی اسپری است که تأثیر مستقیمی بر کیفیت احتراق می‌گذارد [۳]. زاویه مخروطی بین خطوط مماس به یال خارجی با محور اصلی اسپری را زاویه مخروط اسپری می‌گویند. یک اسپری به دلیل غیرهمگن بودن فرایند تجزیه و اتمیزاسیون، ترکیبی غیرهمگن از قطراتی با اندازه‌های مختلف است؛ بنابراین محاسبه قطر میانگین ساوتر و توزیع قطرات ضروری است. مشخصه عملکردی دیگری که در بررسی فرایند اسپری مورد توجه است، عمق نفوذ اسپری است. عمق نفوذ اسپری به فاصله میان نوک اسپری و اریفیس اتمایزر می‌گویند. لیو و همکاران (۲۰۰۶) یک اتمایزر هوا - ورزش با جریان‌های هم‌محور را به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار داده و مشاهده کردند که تغییرات قطر نازل مایع قطر میانگین قطرات را تغییر می‌دهد و این تغییرات با افزایش نسبت جریان جرمی مایع به گاز، بیش‌تر می‌شود [۴]. آنها همچنین نشان دادند که با ثابت نگه‌داشتن نسبت شار جرمی مایع به گاز، تغییرات قطر میانگین ساوتر برحسب عدد وبر^۴، سرعت تزریق مایع و نسبت شار مومنتوم گاز به مایع، روند یکنواخت نداشته و این روند ابتدا نزولی و سپس صعودی می‌شود. سینها و همکاران (۲۰۱۵) یک اتمایزر هوا ورزش با جریان‌های متقاطع را به‌صورت تجربی مطالعه کردند و نشان دادند که عمق نفوذ اسپری وابسته به نسبت مومنتوم گاز به مایع است [۵]. این پارامتر در نسبت مومنتوم‌های بالاتر افزایش یافته و پراکندگی اسپری بیشتر می‌شود. آنها همچنین نشان دادند که با فاصله‌گرفتن از دیواره اتمایزر، قطر میانگین ساوتر قطرات افزایش یافته، در حالی‌که با حرکت در راستای جریان پرسرعت گاز این پارامتر کاهش می‌یابد.

ما و همکاران (۲۰۱۴) دو نوع اتمایزر هوا - ورزش، که دارای ساختار متفاوتی در اختلاط گاز و مایع بودند، را به‌صورت تجربی

۲. تجهیزات آزمایشگاهی

در شکل ۱ چیدمان آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه نمایش داده شده است. این چیدمان که از سه قسمت اصلی شامل مسیر تغذیه مایع (آب)، منبع تغذیه هوای فشرده و اتمایزر تشکیل شده است. همچنین از یک دوربین پرسرعت^۷ با سرعت تصویربرداری ۲۵۰۰ فریم بر ثانیه و یک سامانه لیزری^۸ به منظور اندازه‌گیری قطر قطرات استفاده شده است. دوربین پرسرعت مورد استفاده می‌تواند تصاویر را با وضوح تصویر (رزولوشن) ۶۴۰×۴۸۰ ثبت و به صورت همزمان به یک رایانه ارسال کند. زاویه اسپری در این روش با استفاده از پردازش تصویر به دست می‌آید. مسیر تغذیه آب از چهار المان اصلی مخزن مایع با حجم $۱/۱$ متر مکعب متصل به یک شیر فیلتردار به منظور جلوگیری از نفوذ ناخالصی و مواد زائد به داخل مجرای تزریق مایع اتمایزر، پمپ پیستونی با قابلیت تنظیم فشار تا ۵۰ بار و تأمین دبی ۵۰ لیتر بر دقیقه، شیر سوزنی برای کنترل دبی و در نهایت اتمایزر متصل به نگه‌دارنده تشکیل شده است. قسمت تأمین هوای فشرده از سه المان تشکیل شده است: مخزن تأمین هوای فشرده با حجم ۵۰ لیتر و فشار حداکثر ۱۴۰ بار، شیر تنظیم فشار و اتمایزر که در انتهای مسیر است و به خط تغذیه آب متصل است. میزان دبی هوا توسط یک دبی‌سنج دیجیتال و دبی مایع توسط یک دبی‌سنج روتاری^۹ اندازه‌گیری شده است. در شکل ۲ نمای شماتیک و واقعی اتمایزر نمایش داده شده است. هوای فشرده پرسرعت از قسمت میانی اتمایزر عبور کرده و مایع نیز از طریق منافذ دایروی به جریان گاز پرسرعت تزریق می‌شوند. این منافذ تزریق پیرامون اتمایزر با زاویه قطاع ۶۰ درجه نسبت به محور آن چیده شده‌اند. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، پارامترهای هندسی اتمایزر مورد بررسی شامل زاویه تزریق، $d_g = 2.15 \text{ cm}$ قطر خروجی اتمایزر، d_l قطر منافذ تزریق مایع، l طول اختلاط گاز و مایع و $l_i = 5 \text{ cm}$ طول اتمایزر می‌باشند.

۳. روش شبیه‌سازی عددی

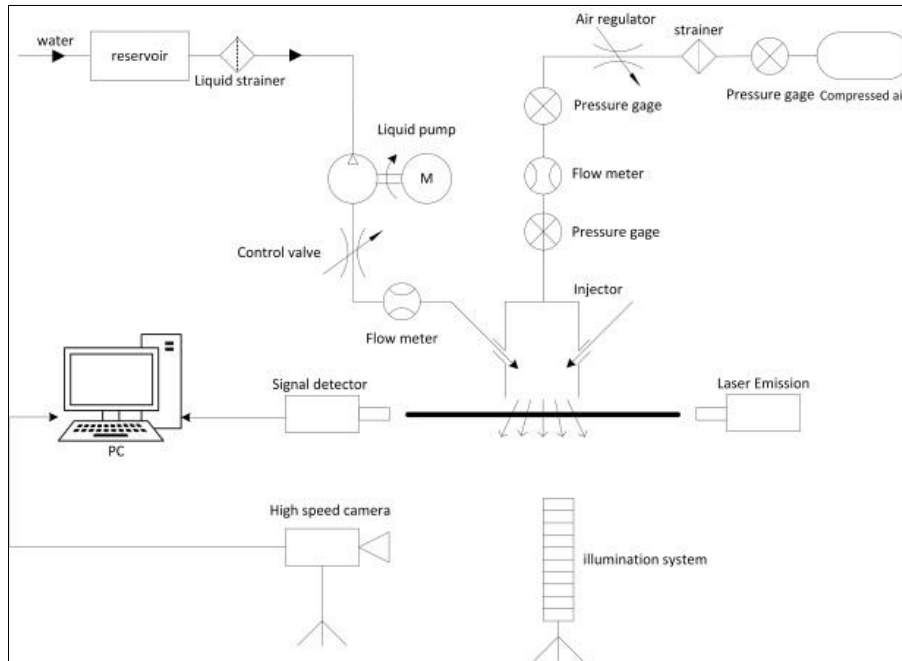
در این پژوهش برای شبیه‌سازی جریان اسپری از نرم‌افزار اوپن‌فوم استفاده شده است. برای این منظور از حلگر اسپری‌فوم^{۱۰} نرم‌افزار اوپن‌فوم به منظور مدل‌سازی فرایند اسپری استفاده شده است. این حلگر قابلیت حل گذرای جریان‌های دوفازی تراکم‌پذیر آرام و آشفته را دارد. در این حلگر به منظور حل فاز گسسته از رویکرد

مورد آزمایش قراردادند [۶]. آنها تأثیر پارامترهای فشار هوا، فشار مایع و نحوه اختلاط گاز و مایع را بر زاویه اسپری و سرعت قطرات مورد بررسی قراردادند. نتایج کار آنها نشان داد زاویه اسپری به شدت به فشار جریان گاز وابسته است و در فشارهای بالای گاز، زاویه اسپری به نحوه اختلاط گاز و مایع بستگی دارد. همچنین مشاهده کردند که فشار مایع تأثیر بسیار اندکی بر زاویه اسپری و سرعت قطرات می‌گذارد. با اینکه مطالعات تجربی متعددی روی اتمایزرها انجام شده است، اما مطالعات عددی در این زمینه اندک است. هوآنگ و لیانییکوف (۲۰۱۱)، در دانشگاه چلمرز، یک اتمایزر فشاری پیچشی را به وسیله نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم مدل‌سازی کردند که قابلیت خوبی در شبیه‌سازی فرایند اسپری دارد [۷]. آنها نشان دادند که استفاده همزمان از توزیع روزین راملر برای شکست اولیه و مدل Reitz-Diwakar برای مدل‌سازی شکست ثانویه، بهترین نتایج را در تطابق با داده‌های تجربی به دست می‌دهند. آنها همچنین اصلاحاتی را روی مدل KHRT برای مدل‌سازی شکست ثانویه انجام دادند که به بهبود عملکرد این مدل در پیش‌بینی رفتار اتمایزر مورد مطالعه منجر شد. امروزه بررسی عددی و مدل‌سازی به‌جای آزمون آزمایشگاهی اتمایزرها در جهت کاهش هزینه و زمان مورد توجه قرار گرفته است. از طرف دیگر، برای رسیدن به مدل‌سازی قابل اعتماد و بهره‌گیری از حلگرهای مناسب در شبیه‌سازی، مقایسه با نتایج تجربی ضروری به نظر می‌رسد.

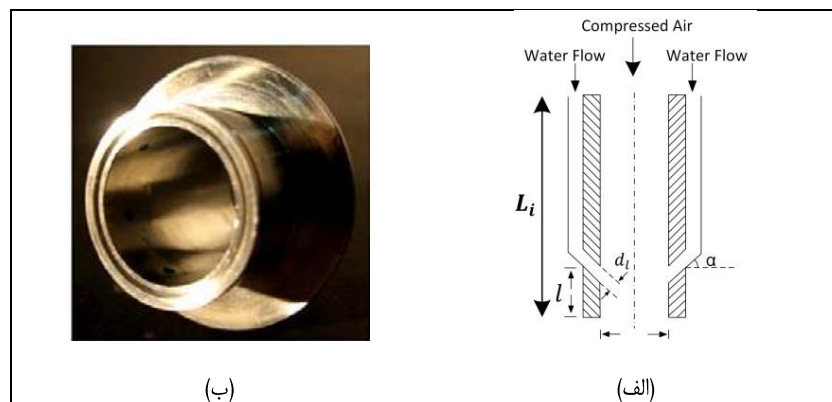
در این مقاله ابتدا یک اتمایزر دوسیاله هوا-وزش با استفاده از سیستم اندازه‌گیری لیزری مالورن^۵ مورد آزمایش قرار گرفته است. از طرفی، اتمایزر با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم^۶ مدل‌سازی شده و در پایان نتایج آزمایش اتمایزر با خروجی‌های مدل‌سازی مقایسه شده‌اند. در شبیه‌سازی اتمایزرها، با توجه به پیچیدگی اسپری‌ها، تفاوت اتمایزرها از نظر روش تولید اسپری و فشارهای تزریق متفاوت حلگری کامل و جامعی وجود ندارد. به منظور تعیین ثابت‌های اصلی معادلات شبیه‌سازی خاص یک اتمایزر و سنجش توانایی روش‌های موجود، باید از ترکیب آزمایش تجربی و مدل‌سازی استفاده کرد. در این مقاله ترکیب روش تجربی و شبیه‌سازی به این منظور استفاده شده است. در گذشته فانگ و همکاران (۲۰۱۲) نیز به منظور نهایی‌کردن شبیه‌سازی عددی اسپری اتمایزرهای فشار پایین و به دست آوردن ثابت‌های مدل شکست از این روش استفاده کرده‌اند [۸].

چشمه موجود در معادلات حاکم بر فاز پیوسته لحاظ می‌کند و سپس با حل فاز پیوسته می‌توان از این میدان برای تعیین مسیر حرکت قطرات در گام زمانی آینده استفاده کرد. فرض اساسی در این رویکرد این است که فاز گسسته کسر حجمی پایین‌تری را در مقایسه با فاز پیوسته اشغال می‌کند [۹]. این خصیصه سبب می‌شود این روش برای مدل‌کردن فرایندهایی مثل خشک‌کن پاششی و اسپری سوخت مایع مورد استفاده قرار گیرد.

لاگرانژی و برای فاز پیوسته از رویکرد اویلری استفاده می‌شود. به‌طور متداول از دو رویکرد اویلری - لاگرانژی و اویلری - اویلری برای رسیدن به محاسبات عددی در جریان‌های دوفازی استفاده می‌شود. در رویکرد لاگرانژی - اویلری، فاز پیوسته گاز با حل معادلات ناویر استوکس با میانگین زمانی و فاز گسسته مایع، توسط رهگیری قطرات حل می‌شود. در این حالت، فاز گسسته تأثیر خود را از طریق تبادل مومنتوم، جرم و انرژی در جملات



شکل ۱. چیدمان آزمایشگاهی مورد استفاده



شکل ۲. اتمایزر مورد مطالعه، الف) شماتیک داخل اتمایزر، ب) نمای واقعی

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_g u_j) = S_{ev} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_g u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_g u_j u_i + p \delta_{ij} - \tau_{ij}) = S_{mo} \quad (2)$$

۳-۱. معادلات حاکم بر فاز گاز

معادلات حاکم بر فاز گاز به‌عنوان یک سیال پیوسته تراکم پذیر، با استفاده از متغیرهای تانسوری، روابط ۱ تا ۳ می‌باشند.

چشمه در معادلات ۱ تا ۳ استفاده می‌شود [۱]. ترم‌های چشمه S_{ev} ، S_{mo} و S_{he} که در معادلات فاز پیوسته بیان شدند با استفاده از نرخ تغییر جرم، مومنتوم و انرژی ذرات لاگرانژی قابل محاسبه‌اند. همان‌گونه که در روابط ۷ تا ۹ بیان شده است این تغییرات با استفاده از تابع توزیع قطرات (f) به‌دست می‌آیند.

$$S_{ev} = - \int f \rho_l 4\pi r^2 \frac{\partial r}{\partial t} d\mathbf{u}_d dr dT dy dy \quad (7)$$

$$S_{mo} = - \int f \rho_l \left[\frac{4}{3} \pi r^3 \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \mathbf{g} \right) + 4\pi r^2 \frac{\partial r}{\partial t} \mathbf{u}_d \right] d\mathbf{u}_d dr dT dy dy \quad (8)$$

$$S_{he} = - \int f \rho_l \times \left\{ \begin{aligned} &4\pi r^2 \left[I_1 + \frac{1}{2} (\mathbf{u}_d - \mathbf{u}_g)^2 \right] + \\ &\frac{4}{3} \pi r^3 \left[c_1 \frac{\partial T}{\partial t} + \left(\frac{\partial \mathbf{u}_d}{\partial t} - \mathbf{g} \right) \cdot (\mathbf{u}_d - \mathbf{u}_g - \mathbf{u}'_g) \right] \end{aligned} \right\} d\mathbf{u}_d dr dT dy dy \quad (9)$$

در این روابط \mathbf{g} بردار شتاب گرانش، I_1 انرژی داخلی، c_1 گرمای ویژه و \mathbf{u}'_g نوسانات سرعت در فاز گاز است [۱].

۳-۲-۱. ردیابی ذرات مایع در محیط پیوسته

به‌منظور مسیریابی ذرات تخلیه‌شده در محیط پیوسته باید رابطه سرعت ذرات را به‌وسیله معادله ممنتوم تعیین نمود. نیروهایی که به یک قطره مایع در محیط گازی وارد می‌شوند عبارت‌اند از: نیروی پسا، گرانش، فشاری و سایر نیروهای حجمی مانند نیروی الکترومغناطیسی. چون مقدار نیروی پسا وارد بر قطره به‌مراتب بزرگتر از سایر نیروهاست، می‌توان از سه نیروی گرانش، فشاری و سایر نیروهای حجمی در مقایسه با نیروی پسا صرف‌نظر کرد. در این صورت رابطه ممنتوم برای یک قطره به‌صورت ۱۰ است [۱۱].

$$m_d \frac{d\mathbf{u}_d}{dt} = \mathbf{F}_d \quad (10)$$

به‌طوری‌که در این رابطه \mathbf{F}_d نیروی پسا وارد بر قطره است و از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$\mathbf{F}_d = \pi r^2 C_D \frac{\rho_g u_{rel} (\mathbf{u}_d - \mathbf{u}_g)}{2} \quad (11)$$

در رابطه ۱۱، u_{rel} سرعت قطره و گاز نسبت به یکدیگر و C_D ضریب پسا است. در مدل شکست تشابهی تیلور مقدار ضریب پسا برای یک ذره با شکل کروی از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_g e) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\rho_g e + p) u_j - \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - u_i \tau_{ij} \right] = S_{he} \quad (3)$$

در رابطه ۱ S_{ev} ترم چشمه ناشی از تبخیر سوخت مایع، در رابطه ۲ S_{mo} ترم چشمه ناشی از اندرکنش فاز گاز و سیال و در رابطه ۳ S_{he} ترم چشمه ناشی از انتقال حرارت بین دو فاز گاز و مایع است [۱]. در پژوهش حاضر به‌منظور مدلسازی جریان مغشوش از مدل آشفستگی k-ε استاندارد استفاده شده است که فرم کلی معادلات در این مدل به‌صورت زیر می‌باشند. ضرایب اصلی مدل k-ε استاندارد در جدول ۱ آمده است [۱۰].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_g k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_g k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho_g \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_g \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_g \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \rho_g \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

جدول ۱. ثوابت مدل اغتشاشی k-ε استاندارد

C_μ	σ_ε	σ_k	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$
۰/۰۹	۱/۳	۱	۱/۳۵	۱/۸

۳-۲. معادلات حاکم بر فاز مایع

در این مقاله فاز مایع از دیدگاه لاگرانژی بررسی و فرض می‌شود که این فاز به‌صورت ذرات کروی‌شکل در محیط پیوسته تخلیه شود. به‌همین علت استفاده از یک رهیافت آماری جهت پیش‌بینی توزیع قطرات مناسب به‌نظر می‌رسد. توزیع قطرات با تابع چگالی احتمال $f(x, u_d, t, r, T, y, \dot{y}) dx du_d dr dt dT dy dy$ بیان می‌شود. این تابع، تعداد احتمالی قطرات بر واحد حجم است که متغیرهای آن سرعت قطره، موقعیت مکانی و زمانی، شعاع قطره، دمای قطره و جابه‌جایی خط استوا قطره نسبت به حالت تعادل می‌باشند. معادله بقایی تابع احتمال f به‌صورت ۶ است.

$$\begin{aligned} &\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla_x \cdot (f \mathbf{u}_d) + \nabla_v \cdot (f \frac{\partial \mathbf{u}_d}{\partial t}) + \frac{\partial}{\partial r} (f \frac{\partial r}{\partial t}) \\ &+ \frac{\partial}{\partial T} (f \frac{\partial T}{\partial t}) + \frac{\partial}{\partial y} (f \frac{\partial y}{\partial t}) + \\ &\frac{\partial}{\partial \dot{y}} (f \frac{\partial \dot{y}}{\partial t}) = \dot{f}_{br} + \dot{f}_{co} \end{aligned} \quad (6)$$

در سمت راست رابطه ۶ دو عبارت چشمه \dot{f}_{br} و \dot{f}_{co} وجود دارد که به‌ترتیب بیان‌کننده سهم برخورد قطرات و شکست آنها در تعداد قطرات است. از تابع احتمال f برای به‌دست آوردن ترم‌های

اندازه قطرات توابع متعددی معرفی شده که در این مقاله با توجه به نوع آتمایزر و شکل اسپری آن از توزیع استاندارد رزین - راملر استفاده شده است. توابع توزیع استاندارد رزین - راملر در روابط ۱۶ و ۱۷ ارائه شده است [۱۱].

$$F(D) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{D}{d}\right)^n\right] \quad (16)$$

$$f(D) = -\frac{n}{D} \left(\frac{D}{d}\right)^{n-1} \exp\left[-\left(\frac{D}{d}\right)^n\right] \quad (17)$$

رابطه ۱۶ یک تابع توزیع تجمعی^{۱۲} و رابطه ۱۷ یک تابع چگالی احتمال است که با دیفرانسیل گیری از رابطه ۱۶ به دست می آید. تابع ۱۷ دو پارامتر ورودی n و d دارد. پارامتر n میزان پراکندگی در اندازه قطرات را بیان می کند. با افزایش n یکنواختی توزیع اندازه قطرات افزایش یافته و از پراکندگی آن کاسته می شود. پارامتر d اندازه متوسط قطرات توزیع شده است. قطرات حاصل از شکست اولیه نیز همانند توده سیال خارج شده از نازل بر اثر نیروهای ائرو دینامیکی دچار تغییر شکل شده و در نهایت متلاشی می شوند. به شکست قطرات بزرگتر (قطرات والد) و تبدیل آنها به قطرات کوچکتر، شکست ثانویه گفته می شود. به منظور مدلسازی شکست ثانویه مدل هایی ارائه شده است که مدل کلون هلمهولتز - رایلی تیلور^{۱۳} و مدل تشابهی تیلور^{۱۴} در پژوهش های اخیر کاربرد گسترده تری نسبت به سایر مدل ها داشته اند که در این مقاله از مدل KHRT استفاده می شود [۱۱، ۱۳].

۳-۲-۱. مدل کلون هلمهولتز - رایلی تیلور

در مدل شکست KHRT، ایجاد دو ناپایداری کلون - هلمهولتز و رایلی - تیلور به طور همزمان در سطح قطره موجب شکست آن می شود. ناپایداری کلون هلمهولتز به دلیل حرکت نسبی مماسی در سطح مشترک دو فاز به وجود می آید، در حالی که ناپایداری رایلی - تیلور به علت ایجاد بردار شتابی عمود بر سطح مشترک دو فاز است. در زیر مدل کلون هلمهولتز فرض می شود اندازه قطرات کوچکی که از قطره بزرگتر (والد) جدا می شوند از رابطه ۱۸ به دست آید.

$$r_{KH} = B_0 \Lambda_{KH} \quad (18)$$

نرخ کاهش شعاع قطرات اولیه از رابطه ۱۹ به دست می آید.

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{r - r_{KH}}{\tau_{KH}} \quad (19)$$

$$C_{D,sphere} = \begin{cases} \frac{24}{Re_d} \left(1 + \frac{1}{6}\right) Re_d^{2/3}, & Re_d < 1000 \\ 0.424, & Re_d > 1000 \end{cases} \quad (12)$$

به طوری که در آن Re_d عدد رینولدز مربوط به قطره است و از رابطه ۱۳ محاسبه می شود.

$$Re_d = \frac{2\rho_g r u_{rel}}{\mu_g} \quad (13)$$

رابطه ۱۲ مقدار ضریب پسا برای یک قطره کروی را نتیجه می دهد، اما یک قطره در یک میدان گازی تحت تأثیر نیروهای مختلف تغییر شکل داده و لازم است ضریب پسا براساس تغییر شکل قطره محاسبه شود. در حالت کلی ضریب پسا برای یک ذره با در نظر گرفتن تغییر شکل آن از رابطه ۱۴ به دست می آید.

$$C_D = C_{D,sphere}(1 + 2.632y) \quad (14)$$

به طوری که در این رابطه y میزان جابه جایی خط استوا قطره نسبت به حالت تعادل آن است. از معادله ۱۰ می توان سرعت ذره را تعیین نمود و با استفاده از رابطه ۱۵ و انتگرال گیری نسبت به زمان، مکان ذره در زمان دلخواه تعیین می شود.

$$\mathbf{u}_d = \frac{d\mathbf{x}_d}{dt} \quad (15)$$

۳-۲-۲. مدلسازی شکست اولیه و ثانویه

توده مایع پس از خروج از نازل، به علت نیروهای ائرو دینامیکی ناشی از اختلاف سرعت بین دو فاز گاز و مایع دچار ناپایداری می شود. رشد امواج روی سطح مایع سبب جدانشدن اولین قطرات از سطح مایع می شود که به این فرایند شکست اولیه می گویند. نتایج تحقیقات گروگی و همکاران نشان می دهد که در یک آتمایزر فشاری با افزایش فشار تزریق مایع (در نتیجه افزایش سرعت نسبی بین دو فاز گاز و مایع) طول توده مایع قبل از شکست اولیه کاهش می یابد، به طوری که در فشار ۱۹ تا ۳۲ مگاپاسکال (سرعت خروج مایع ۱۹۴ تا ۲۵۲ متر بر ثانیه برای آب با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) ابعاد توده مایع قبل از شکست اولیه بسیار ناچیز است [۱۲]. چون در آتمایزر مورد مطالعه در این مقاله سرعت نسبی گاز و مایع بسیار زیاد بوده (در محدوده ۱۵۰ تا ۴۰۰ متر بر ثانیه)، از طرفی چون برای مدلسازی فاز مایع از دیدگاه لاگرانژی استفاده می شود، فرض می شود که مایع، نازل را به صورت قطرات مجزا ترک می کند؛ بنابراین لازم است شرایط اولیه برای قطرات اسپری از جمله سرعت، زاویه خروج از نازل و همچنین توزیع اندازه قطرات تعیین شود. به منظور تعیین توزیع

امواج رایلی تیلور تنها وقتی منجر به شکست قطره می‌شوند که امواج با سریع‌ترین نرخ رشد طول موجی کمتر از قطر قطره داشته باشند.

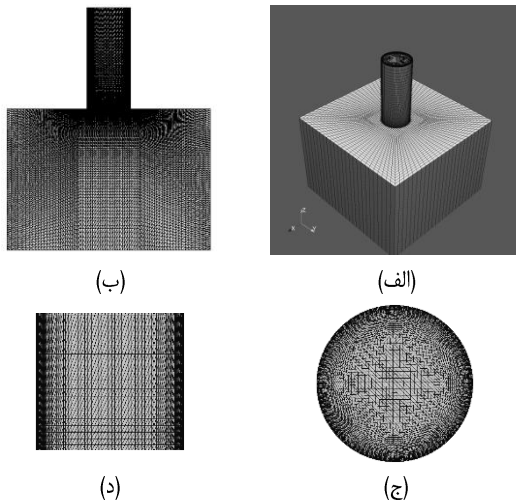
$$2r > \Lambda_{RT} = \frac{2\pi C_{RT}}{K_{RT}} \quad (29)$$

$$\tau_{RT} = \frac{C_r}{\Omega_{RT}} \quad (30)$$

رشد امواج رایلی تیلور پس از مدت زمان مشخصه منجر به شکست قطره می‌شود. در روابط اخیر $C_r = 1$ و $C_{RT} = 0.1$ است.

۳-۳. شبکه محاسباتی و شرایط مرزی

هندسه میدان محاسباتی به همراه شبکه‌بندی آن در مقاطع مختلف، که در نرم‌افزار اوپن‌فوم ایجاد شده، در شکل ۳ نمایش داده شده است. هوای پرسرعت از قسمت میانی اتمایزر جریان می‌یابد و مایع آب نیز از شش منفذ پیرامون آن در جریان گاز پرسرعت تزریق می‌شود. به منظور مدل‌سازی اتمسفر بیرون از اتمایزر فرض شده است که یک کانال به طول L و عرض H به خروجی اتمایزر متصل شده باشد. برای اطمینان از مناسب بودن مکان شرط مرزی دیواره در کانال و عدم تأثیر آن بر جریان خروجی از اتمایزر، مقدار H به اندازه ۳، ۵ و ۱۰ برابر قطر هیدرولیکی خروجی اتمایزر انتخاب شد و با بررسی نتایج خروجی مشاهده شد که میدان سرعت با تغییر H از مقدار ۵ به ۱۰ برابر قطر هیدرولیکی خروجی اتمایزر بدون تغییر باقی می‌ماند؛ بنابراین مقدار H برابر با d_g و مقدار L نیز برابر با ۷ سانتی‌متر انتخاب شده است.



شکل ۳. نمای از الف) نمای سه‌بعدی شبکه محاسباتی

ب) نمای دوبعدی شبکه محاسباتی، ج و د) سطح مقطع داخل اتمایزر

$$\tau_{KH} = \frac{3.788 B_1 r}{\Omega_{KH} \Lambda_{KH}}$$

به طوری که در روابط اخیر، $B_0 = 0.61$ و $B_1 = 40$ ثابت مدل هستند. همچنین Λ_{KH} طول موج رشدکننده (روی سطح قطره) با سریع‌ترین نرخ رشد و Ω_{KH} فرکانس مربوط به این موج می‌باشد.

$$\Lambda_{KH} = 9.02r \frac{(1+0.45Z^{0.5})(1+0.4Ta^{0.7})}{(1+0.87We_g^{1.67})^{0.6}} \quad (20)$$

$$\Omega_{KH} = \frac{0.34+0.38We_g^{1.5}}{(1+Z)(1+1.4Ta^{0.6})} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_l r^3}} \quad (21)$$

که اعداد بدون بعد تیلور^{۱۵}، وبر، اونسورگ^{۱۶} و همچنین عدد رینولدز آب با استفاده از روابط ۲۲ تا ۲۵ تعریف می‌شوند.

$$Ta = Z \sqrt{We_g} \quad (22)$$

$$Z = \frac{\sqrt{We_l}}{Re_l} \quad (23)$$

$$We_g = \frac{\rho_g (u_g - u_l)^2 d_l}{\sigma} \quad (24)$$

$$We_l = \frac{\rho_l (u_g - u_l)^2 d_l}{\sigma}$$

$$Re_l = \frac{\rho_l u_l d_l}{\mu_l} \quad (25)$$

زیر مدل رایلی تیلور نیز مانند زیر مدل کلوین هلمهولتز براساس انتشار امواج ناپایدار روی سطح قطره تعریف می‌شود. عدد موج مربوط به سریع‌ترین امواج ناپایدارکننده رایلی تیلور از رابطه ۲۶ و فرکانس مربوط به آن از رابطه ۲۷ به دست می‌آید.

$$K_{RT} = \sqrt{\frac{-a(\rho_l - \rho_g)}{3\sigma}} \quad (26)$$

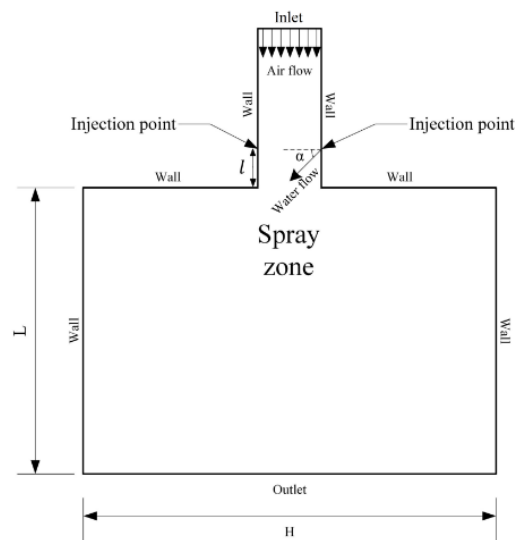
$$\Omega_{RT} = \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\sigma} \frac{[-a(\rho_l - \rho_g)]^{3/2}}{\rho_l + \rho_g}} \quad (27)$$

در رابطه ۲۷، a شتاب سطح مشترک دو فاز است. جهت این شتاب از ناحیه سیال سبک‌تر به سمت سیال سنگین‌تر است. به منظور ایجاد ناپایداری در سطح مشترک دو فاز لازم است شتاب سطح مشترک منفی باشد. شتاب مشترک دو فاز را با استفاده از نیروی پسا وارد بر قطره می‌توان از رابطه ۲۸ محاسبه کرد.

$$a = -\frac{3}{8} C_D \frac{\rho_g u_{rel}^2}{\rho_l r} \quad (28)$$

گرفته شده است. نتایج SMD نشان داد که حل عددی در شبکه محاسباتی با تعداد سلول ۴۰۶۲۵۰ مستقل از شبکه بندی بوده و این تعداد مبنای شبیه سازی قرار می گیرد. شبکه محاسباتی و هندسه استفاده شده در این مقاله هر دو با استفاده از ابزار blockMesh در بسته نرم افزاری اوپن فوم ایجاد شده است. برای ایجاد شبکه محاسباتی با کیفیت مناسب و بهینه، همچنین افزایش قابلیت کنترل اندازه سلولها در نواحی مشخص، هندسه داخل آتمایزر و کانال خارجی متصل به آن هر کدام توسط ۵ بلوک ایجاد شده است که در شکل ۵ مشاهده می شود. همچنین تعداد سلولها در هر بلوک براساس شماره آن در جدول ۵ آمده است.

در شکل ۴ نمای دوبعدی از میدان محاسباتی به همراه نام هر یک از مرزها نمایش داده شده است. شرط مرزی مربوط به هر یک از مرزها در نرم افزار اوپن فوم انتخاب شده و مهم ترین آنها در جداول ۲ تا ۴ ذکر شده است. چون در شبیه سازی عددی، حل مسئله مورد نظر می تواند به تعداد سلول محاسباتی وابسته باشد و از طرفی با افزایش تعداد سلول دقت حل و نیز زمان محاسبات افزایش می یابد، لازم است تعداد سلول بهینه انتخاب شود که به ازای تعداد سلولهای بیشتر از آن دقت حل تغییر قابل توجهی نمی کند. پارامتر قطر SMD در فاصله ۵ سانتی متر از خروجی آتمایزر به عنوان معیار سنجش استقلال حل از شبکه در نظر



شکل ۴. نمای دوبعدی میدان محاسباتی

جدول ۲. شرایط مرزی در مرز Inlet

Fixed Value	u
Zero Gradient	P
Fixed Value	T
Turbulent Intensity Kinetic Energy Inlet	K
Turbulent Mixing Length Dissipation Rate Inlet	ϵ

جدول ۳. شرایط مرزی در مرز Outlet

Zero Gradient	u
Fixed Value	P
Zero Gradient	T
Zero Gradient	K
Zero Gradient	ϵ

جدول ۴. شرایط مرزی در مرز Wall

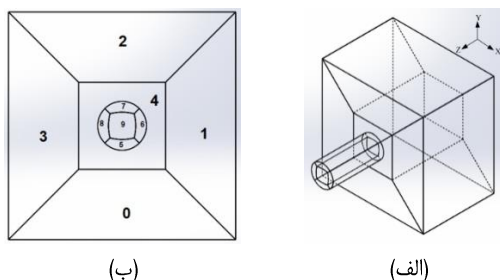
Fixed Value	u
Zero Gradient	P
Zero Gradient	T
Compressible: kq Wall Function	K
Compressible: epsilon Wall Function	ϵ

قطر تزریق مایع بر روی SMD در اعداد وبر مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد (جدول ۶). گفتنی است چون مقدار SMD در بررسی آزمایشگاهی اتمایزر، در فاصله ۵ سانتی‌متر از خروجی آن اندازه‌گیری شده است، در شبیه‌سازی عددی نیز قطر میانگین ساوتر قطرات در صفحه‌ای به ضخامت ۱ میلی‌متر و در فاصله ۵ سانتی‌متر از خروجی اتمایزر محاسبه شده است. اتمایزهایی که در این مرحله شبیه‌سازی می‌شوند دارای طول اختلاط $l = 8\text{mm}$ و زاویه تزریق $\alpha = 53^\circ$ می‌باشند. تمام پارامترهای ذکر شده در جدول ۷ به‌غیر از عدد وبر ائرودینامیکی، که تعریف آن در رابطه ۲۴ بیان شد، به‌عنوان ورودی در فرایند شبیه‌سازی به حلگر معرفی می‌شوند.

جدول ۶. مشخصات مشترک اتمایزهای شبیه‌سازی شده

۳۰۲	دمای آب (کلوین)
۲۹۸	دمای گاز (کلوین)
۱/۱۸۴	چگالی گاز (کیلوگرم بر متر مکعب)
۱۰۰۰	چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)
۰/۰۷۱۲	کشش سطحی (نیوتن بر متر)
۰/۰۰۵	زمان کل (ثانیه)
۱۶۵۰	رینولدز آب

همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، پارامتر d مربوط به تابع رزین راملر برای شرایط مختلف جریانی و هندسی یکسان نیست و با توجه به مقادیر SMD ثبت‌شده در آزمایشگاه و مقایسه آن با نتایج شبیه‌سازی مقدار بهینه d برای هر اتمایزر به‌دست آمده است. نتایج ارائه‌شده در جدول ۷ نشان می‌دهد با افزایش وبر در یک قطر تزریق ثابت پارامتر d با شیب تقریباً ثابتی کاهش می‌یابد و همین روند برای کاهش قطر تزریق در یک وبر ثابت مشاهده می‌شود. تابع رزین راملر به‌منظور اعمال شرایط قطرات حاصل از



شکل ۵. الف) نمای سه‌بعدی تقسیم‌بندی هندسه میدان محاسباتی
ب) تقسیم‌بندی هندسه میدان محاسباتی به‌همراه شماره هر قسمت

جدول ۵. تعداد سلول‌های محاسباتی در هر بلوک

شماره بلوک	$(N_x \times N_y \times N_z)$ (تعداد در هر بلوک)
۴، ۳، ۲، ۱، ۰	۵۰۰۰۰ (۲۵×۲۵×۸۰)
۹، ۸، ۷، ۶، ۵	۳۱۲۵۰ (۲۵×۲۵×۵۰)

۴. بحث و بررسی نتایج

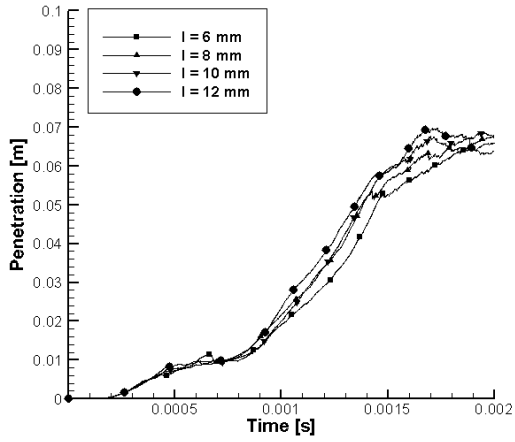
معادلات حاکم بر جریان اسپری شامل معادلات فاز پیوسته، فاز گسسته و مدلسازی شکست قطرات توسط نرم‌افزار اوپن‌فوم حل شده است. پارامترهای اثرگذار بر مشخصات اساسی اتمایزر از جمله SMD، عمق نفوذ و زاویه مخروطی را می‌توان به دو گروه پارامترهای هندسی و جریانی تقسیم کرد. مهم‌ترین پارامتر جریانی که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد عدد وبر جریان گاز است. پارامترهای هندسی نیز شامل قطر تزریق مایع، زاویه تزریق و طول اختلاط گاز و مایع می‌باشند. با توجه به اینکه شرایط آزمایشگاهی در حالت سرد و غیرتبخیری است، در شبیه‌سازی عددی این شرایط لحاظ شده و از اثر تبخیر اسپری (که معمولاً به علت دمای بسیار زیاد محفظه احتراق رخ می‌دهد) صرف‌نظر شده است. مشخصات مشترک شرایط مختلف شبیه‌سازی شده، شامل مشخصات هندسی و جریانی با توجه به شرایط آزمایشگاهی در جدول ۶ ارائه شده است. در مرحله نخست تأثیر پارامتر هندسی

شکست اولیه در شبیه‌سازی به کار می‌رود. از طرفی بدیهی است که با تغییر شرایط جریانی و هندسی آتمایزر، شکست اولیه مایع تزریق شده نیز دستخوش تغییرات شده و قطر متوسط قطرات حاصل از شکست اولیه (d) تغییر کند. در نتیجه لازم است برای شرایط مختلف مقدار مناسب برای پارامتر d در نظر گرفته شود که این امر با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تحقیق‌یافته است. نمودار شکل ۶ نتایج حاصل از شبیه‌سازی آتمایزرهای شماره ۱ تا ۱۶ (جدول ۷) و نتایج آزمایشگاهی را در خصوص تأثیر پارامتر هندسی قطر تزریق مایع بر روی SMD نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که کاهش قطر تزریق مایع کاهش SMD و در نتیجه افزایش کیفیت اسپری را در پی دارد. همچنین در یک قطر تزریق مشخص با افزایش عدد وبر قطر میانگین قطرات کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار می‌توان گفت با افزایش عدد وبر، نمودارها به یکدیگر نزدیک شده و تأثیر این پارامتر روی SMD کاهش می‌یابد. این نتایج با آثار فیزیکی ناشی از افزایش عدد وبر قابل پیش‌بینی بود. با افزایش عدد وبر، قطر قطرات کاهش یافته و در نتیجه سطح اثر نیروی پسا روی قطرات کاهش می‌یابد. به همین دلیل با افزایش هرچه بیشتر عدد وبر تأثیر روی SMD کاهش می‌یابد و نمودارها به یکدیگر نزدیک می‌شوند. همان‌طور که مقادیر خطای شبیه‌سازی در جدول ۸ نشان می‌دهد این نتایج با مقادیر ثبت‌شده در آزمون تطابق بسیار خوبی دارد. عمق نفوذ اسپری مشخصه اساسی دیگری است که در بررسی عملکرد آتمایزر بسیار حائز اهمیت است. با توجه به تعیین مدل شکست اولیه (توزیع رزین راملر) و ثانویه برای آتمایزرهای جدول ۶ اکنون به‌وسیله شبیه‌سازی عددی تأثیر پارامترهای هندسی آتمایزر بر عمق نفوذ اسپری مورد بررسی قرار می‌گیرد. آتمایزر شماره ۹ جهت بررسی پارامترهای مختلف بر عمق نفوذ اسپری انتخاب شده است. طول اختلاط گاز و مایع، قطر تزریق و زاویه تزریق پارامترهایی هستند که بررسی تأثیر آنها بر عمق نفوذ اسپری مورد اهمیت است. نمودارهای ۷ و ۸ نیز نشان می‌دهند که تأثیر زاویه تزریق و طول اختلاط بسیار ناچیز است، در حالی‌که با توجه به نمودار ۹ پارامتر قطر تزریق مایع تأثیر قابل توجهی بر عمق نفوذ اسپری می‌گذارد. با توجه به نمودار ۹ می‌توان گفت با افزایش قطر تزریق، عمق نفوذ اسپری کاهش می‌یابد. افزایش قطر تزریق منجر به افزایش

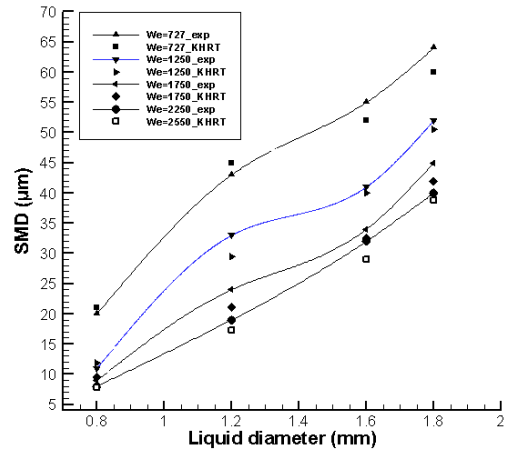
اندازه قطرات اسپری و در نتیجه افزایش نیروی پسا وارد بر سطح قطرات می‌شود. افزایش نیروی پسا می‌تواند توجیه‌کننده کاهش عمق نفوذ اسپری در نتیجه افزایش قطر تزریق مایع باشد. گفتنی است عمق نفوذ اسپری در هر مقطع زمانی بنا بر تعریف ارائه‌شده در بسته نرم‌افزاری اوپن‌فوم برابر است با میزان پیشروی جبهه قسمتی از اسپری که شامل ۹۵ درصد از جرم کل تزریق شده باشد. در شکل ۱۰ نتایج حاصل از شبیه‌سازی و عمق نفوذ اسپری شماره ۱ در دو مقطع زمانی ۲ و ۵ میلی‌ثانیه نمایش داده شده است.

۵. جمع‌بندی

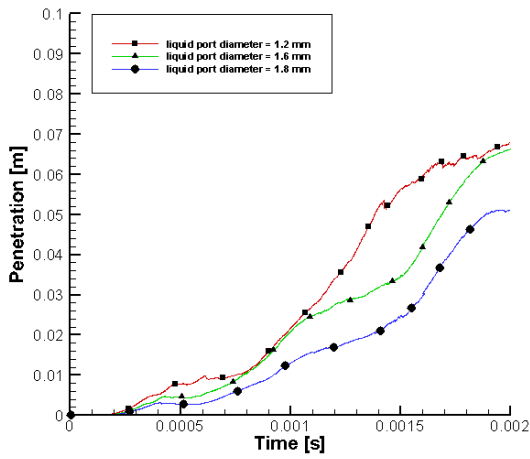
در این مقاله مطالعه‌ای تجربی به‌همراه مدلسازی عددی برای بررسی تأثیر پارامترهای جریانی و هندسی بر قطر میانگین ساوتر و عمق نفوذ اسپری، به‌عنوان دو مشخصه مهم آتمایزرهای دوسیاله انجام شد. در مطالعه آزمایشگاهی قطر میانگین قطرات توسط سامانه لیزری Malvern Master Sizer X اندازه‌گیری و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم مقایسه شد. در شبیه‌سازی عددی نیز مشاهده شد که استفاده از ترکیب تابع توزیع رزین راملر برای شکست اولیه و مدل شکست ثانویه کلون هلمهولتز - رابلی تیلور، به نتایج با خطای کمتر از ۱۰ درصد نسبت به نتایج آزمایشگاهی منجر می‌شود. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که افزایش قطر تزریق در یک وبر ثابت سبب افزایش قطر میانگین ساوتر قطرات می‌شود. با افزایش عدد وبر تأثیر پارامتر قطر تزریق بر SMD کاهش می‌یابد و در یک قطر تزریق ثابت افزایش عدد وبر باعث کاهش قطر میانگین ساوتر قطرات می‌گردد. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی پارامترهای تابع توزیع رزین راملر برای شرایط هندسی و جریانی مختلف به‌دست آمد. تأثیر پارامترهای هندسی مثل طول اختلاط، زاویه تزریق و قطر تزریق مایع بر مشخصه عمق نفوذ، در یک آتمایزر مشخص به‌وسیله شبیه‌سازی عددی بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد پارامترهای طول اختلاط گاز و مایع و زاویه تزریق تأثیر بسیار ناچیز و پارامتر قطر تزریق تأثیر قابل‌توجهی بر عمق نفوذ اسپری دارند.



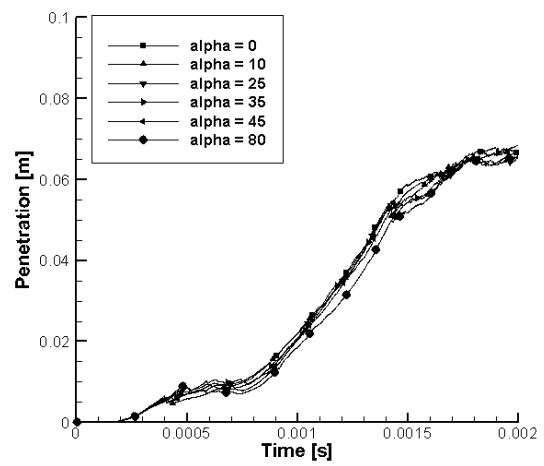
شکل ۷. تأثیر طول اختلاط گاز و مایع بر عمق



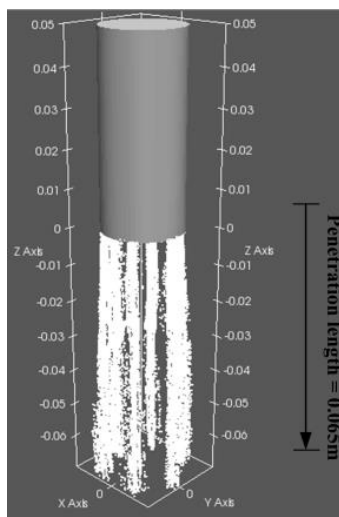
شکل ۶. تغییرات SMD بر حسب قطر تزریق در ویرهای مختلف



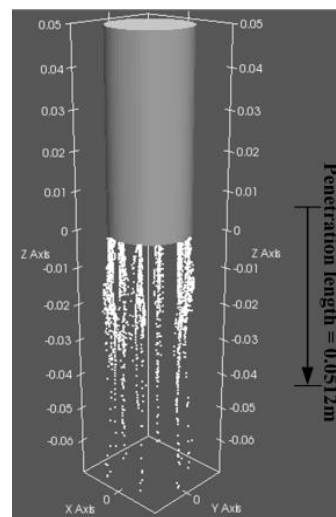
شکل ۹. تأثیر قطر تزریق مایع بر عمق نفوذ اسپری



شکل ۸. تأثیر زاویه تزریق بر عمق نفوذ اسپری



(ب)



(الف)

شکل ۱۰. عمق نفوذ اسپری شماره یک، (الف) زمان ۰/۰۰۲ ثانیه، (ب) زمان ۰/۰۰۵ ثانیه

جدول ۷. مشخصات آتمایزرهای شبیه‌سازی شده

	d (μm)	m_{dot} (mg)	u_i (m/s)	u_g (m/s)	We_g	d_1 (mm)
۱	۵۰	۰/۰۵۶	۰/۷۳	۱۵۶	۷۲۷	۱/۸
۲	۴۰	۰/۰۵۶	۰/۷۳	۲۰۵	۱۲۵۰	۱/۸
۳	۳۵	۰/۰۵۶	۰/۷۳	۲۴۱	۱۷۵۰	۱/۸
۴	۳۰	۰/۰۵۶	۰/۷۳	۲۷۴	۲۲۵۰	۱/۸
۵	۴۵	۰/۰۴۹	۰/۸۲	۱۶۵	۷۲۷	۱/۶
۶	۳۰	۰/۰۴۹	۰/۸۲	۲۱۷	۱۲۵۰	۱/۶
۷	۲۵	۰/۰۴۹	۰/۸۲	۲۵۶	۱۷۵۰	۱/۶
۸	۳۰	۰/۰۴۹	۰/۸۲	۲۹۱	۲۲۵۰	۱/۶
۹	۳۵	۰/۰۳۷	۱/۱	۱۹۱	۷۲۷	۱/۲
۱۰	۲۵	۰/۰۳۷	۱/۱	۲۵۰	۱۲۵۰	۱/۲
۱۱	۲۰	۰/۰۳۷	۱/۱	۲۹۶	۱۷۵۰	۱/۲
۱۲	۲۰	۰/۰۳۷	۱/۱	۳۳۵	۲۲۵۰	۱/۲
۱۳	۲۵	۰/۰۲۵	۱/۶۵	۲۳۳	۷۲۷	۰/۸
۱۴	۲۰	۰/۰۲۵	۱/۶۵	۳۰۷	۱۲۵۰	۰/۸
۱۵	۱۵	۰/۰۲۵	۱/۶۵	۳۶۲	۱۷۵۰	۰/۸
۱۶	۱۵	۰/۰۲۵	۱/۶۵	۴۱۲	۲۲۵۰	۰/۸

جدول ۸. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی

	Error (%)	exp	Num		Error (%)	Exp	Num
۱	۶	۶۴	۶۰	۹	۷	۴۲	۴۵
۲	۳	۵۲	۵۰/۳	۱۰	۱۰	۳۳	۲۹/۴
۳	۶	۴۵	۴۲	۱۱	۱۲	۲۴	۲۱/۰۴
۴	۲	۴۰	۳۹	۱۲	۹	۱۹	۱۷/۳۲
۵	۵	۵۵	۵۲	۱۳	۵	۲۰	۲۱
۶	۲	۴۱	۴۰/۰۴	۱۴	۷	۱۱	۱۱/۸
۷	۷	۳۵	۳۲/۵۲	۱۵	۵	۹	۹/۵
۸	۱۰	۲۹	۳۲	۱۶	۱۰	۸	۷/۸

۶. مأخذ

- [1] X. Jiang, G. Siamas, K. Jagus, and T. Karayiannis, "Physical modelling and advanced simulations of gas-liquid two-phase jet flows in atomization and sprays," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, pp. 131-167, 2010.
- [2] Lefebvre, A. H. "Airblast atomization", *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 6, pp. 233-261, 1980.
- [3] Lee, I. C., Y. S. Kang, H. J. Moon, S. P. Jang, J. K. Kim, J. Koo. "Spray jet penetration and distribution of modulated liquid jets in subsonic cross-flows." *Journal of mechanical science and technology*, vol. 24, pp. 1425-1431, 2010.
- [4] Liu, H. F., W. F. Li, X. Gong, X. K. Cao, J. L. Xu, X. L. Chen, et al. "Effect of liquid jet diameter on performance of coaxial two-fluid

- airblast atomizers." *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 45, pp. 240-245, 2006.
- [5] Sinha, A., R. S. Prakash, A. M. Mohan, R. Ravikrishna. "Airblast spray in crossflow-Structure, trajectory and droplet sizing." *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 72, pp. 97-111, 2015.
- [6] Ma, R., B. Dong, Z. Yu, T. Zhang, Y. Wang, W. Li. "An experimental study on the spray characteristics of the air-blast atomizer." *Applied Thermal Engineering*, 2014.
- [7] Huang, C., A. Lipatnikov. "Modelling of Gasoline and Ethanol Hollow-Cone Sprays Using OpenFOAM," SAE Technical Paper 2011.
- [8] Fung, M. C., K. Inthavong, W. Yang, J. Tu. "CFD modeling of spray atomization for a nasal spray device." *Aerosol Science and Technology*, vol. 46, pp. 1219-1226, 2012.
- [9] F. Manual, "Manual and user guide of Fluent Software," Fluent Inc, 2005.
- [10] Launder, B. E., D. Spalding. "The numerical computation of turbulent flows." *Computer methods in applied mechanics and engineering*, vol. 3, pp. 269-289, 1974.
- [11] Aránguez, A. M. Non-reacting fuel spray simulations under direct injection Disedel engine conditions, 2012.
- [12] Smallwood, G. J., Ö. L. Gülder, D. R. Snelling. "The structure of the dense core region in transient diesel sprays", Symposium (International) on Combustion, 1994, pp. 371-379.
- [13] Salewski, M., L. Fuchs. "Consistency issues of Lagrangian particle tracking applied to a spray jet in crossflow." *International journal of multiphase flow*, vol. 33, pp. 394-410, 2007.

پی نوشت

-
1. air-assist
 2. air-blast
 3. sauter mean diameter (SMD)
 4. Weber number
 5. Malvern
 6. Open Field Operation and Manipulation (OpenFOAM)
 7. mega speed MS50K
 8. Malvern Master Sizer X
 9. rotary flow meter
 10. sprayFoam
 11. probability density function (PDF)
 12. cumulative distribution function (CDF)
 13. Kelvin-Helmholtz-Rayleigh-Taylor (KHRT)
 14. Taylor Analogy Based (TAB)
 15. Taylor number
 16. Ohnesorge number