

بررسی تجربی و عددی هیدرودینامیک انژکتور مارپیچی و ارائه پارامترهای حل سازگار با مشخصات اسپری

مازیار شفائی روشنی^۱، سعید فضلی خانی^۲

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۲۵

چکیده

استفاده از انژکتورهای مارپیچی از جمله روش‌های متداول و مناسب در اسپری مایعات است. در این مقاله، نخست عملکرد این نوع انژکتورهای تک‌پایه به‌روش تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس، اثر دو پارامتر هندسی مهم در این انژکتورها؛ یعنی قطر اوریفیس خروجی و زاویه مارپیچ، به‌عنوان کمیت‌هایی که اثر غالب دارند، بررسی شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که کاهش زاویه مارپیچ و افزایش قطر اوریفیس خروجی، قطر میانگین ساوتر قطرات را افزایش می‌دهند. در ادامه، شبیه‌سازی عددی اسپری انژکتور پیچشی با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم در دو تست مختلف انجام و پارامترهای ضریب شکست اولیه و پارامتر توزیع در مدل عددی به‌صورتی سازگار با نتایج تجربی و در محدوده فشاری پایین ارائه شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که انتخاب مقادیر ۵ و ۳ برای ضریب شکست اولیه و همین‌طور مقادیر ۳ و ۲/۳ برای پارامتر توزیع به‌ترتیب در تست‌های اول و دوم، سرعت و توزیع اندازه قطرات حاصل از اسپری را با دقت خوبی پیش‌بینی می‌کند. با استفاده از ثابت‌های به‌دست‌آمده می‌توان اسپری مخروطی توخالی انژکتورهای مارپیچی در محدوده فشاری پایین (پایین‌تر از ۱۵ بار) را از این پس مستقل از نتایج تجربی مدلسازی کرد.

واژگان کلیدی

اسپری فشار پایین، انژکتور مارپیچی، سیستم اندازه‌گیری لیزری، قطر میانگین ساوتر، اوپن‌فوم^۱

۱. مقدمه

توربین‌های گازی و موتورهای موشک تبدیل شده‌اند. در این انژکتورها سیال به‌دلیل پیچشی که در محفظه داخلی انژکتور پیدا کرده، در نهایت با مومنوم بالای پیچشی از دهانه انژکتور خارج شده و اسپری حاصل به شکل مخروط توخالی و با نسبت سطح

از انژکتورها به‌طور گسترده‌ای در پروژه‌های صنعتی برای تبدیل مایع به قطرات استفاده می‌شود. انژکتورهای پیچشی از جمله پرکاربردترین نوع انژکتورها هستند که امروزه به یکی از ملزومات اصلی جهت ایجاد احتراق مناسب در موتورهای احتراقی،

به حجم بالا در محیط تخلیه می‌شود. انژکتورهای پیچشی به‌طور کلی به‌واسطه نحوه ورود به محفظه انژکتور و نحوه القای پیچش به سیال، به دو دسته پیچشی - فشاری^۲ و پیچشی - ماریچی (به‌طور خلاصه ماریچی^۳) تقسیم می‌شوند. در انژکتورهای پیچشی - فشاری سیال از طریق ورودی‌های مماسی و عمود بر محور انژکتور، مماس بر دیواره محفظه انژکتور وارد آن شده و به‌واسطه همین ورود مماسی شروع به گردش می‌کند. در انژکتورهای ماریچی سیال به‌طور محوری و به‌موازات محور انژکتور وارد محفظه انژکتور شده و به‌دلیل مسیر ماریچی شکل تعبیه‌شده در محفظه، شکل پیچشی پیدا کرده و به‌صورت اسپری مخروطی توخالی از مقطع خروجی انژکتور خارج می‌شود [۱]. به‌منظور داشتن عملکرد مناسب در این انژکتورها، قطرات اسپری باید ویژگی‌های خاصی (قطر قطرات ریز و توزیع اندازه مناسب) داشته باشند. از اینرو، جهت کنترل روی ویژگی‌های اسپری انژکتورها، بررسی تأثیر خواص فیزیکی جریان و پارامترهای هندسی برای رسیدن به یک حالت بهینه موردنیاز می‌باشد [۲].

مطالعات اولیه صورت‌گرفته روی مشخصه‌های اسپری از جمله زاویه اسپری، طول نفوذ، رابطه سرعت اسپری و قطر میانگین ساوتر^۴ و مباحثی چون شکست مایع، برخورد قطرات و تبخیر آنها به ارائه مدل‌هایی برای توصیف این پدیده‌ها در اسپری منجر شد. قطر متوسط ساوتر طبق تعریف معادل قطر قطره‌ای است که نسبت حجم به سطح آن برابر با نسبت حجم به سطح مجموع قطرات است.

هان و همکاران (۱۹۹۷) با بررسی یک اسپری مخروطی توخالی، مدل شکست اولیه Blob را ارائه کردند [۳]. در این مدل ابتدا حباب‌های مایع با قطری برابر با ضخامت ورقه مایع به محیط بیرون تزریق می‌شوند. این قطرات، در ادامه برای شکل‌گرفتن قطرات کروی کوچکتر تحت مدل شکست ثانویه قرار می‌گیرند. این مدل شکست اگرچه به لحاظ کاربردی بسیار ساده و قابل فهم بود، اما ناپایداری‌های حاصل از امواج را روی ورقه مایع در نظر نمی‌گرفت. دمبروسکی و جونز (۱۹۶۳) به بررسی امواج ناپایدارکننده روی شکست ورقه مایع پرداختند [۴]. آنها رابطه‌ای بین اندازه قطرات و طول موج امواج ناپایدارکننده روی سطح مایع یافتند که چون تنها امواج با طول موج بلند را مسبب شکست ورقه مایع می‌دانستند، رابطه آنها عمومیت نداشت. بعدها لی و تانکین (۱۹۹۱) توانستند رابطه انتشار را برای نرخ رشد امواج ناپایدارکننده

پیدا کنند که اگرچه جامع و فراگیر بود، اما به‌دلیل غیرخطی بودن و عدم استفاده از فرض‌های ساده‌کننده، رابطه ایشان نیز پیچیده و غیرکاربردی شد [۵]. سرانجام سنکال و همکاران (۱۹۹۹) توانستند به‌کمک یک تحلیل صفربعدی اولاً محاسبات شکست اولیه ورقه مایع را مستقل از اندازه‌های داخلی انژکتور کرده و ثانیاً شکست مایع را براساس عدد وبر بحرانی ۱/۶۸۷۵ مورد مطالعه قرار دهند [۶]. به این ترتیب که در اعداد وبر بالاتر از این مقدار، امواج با طول موج کوتاه (به اختصار امواج کوتاه^۵) و در اعداد وبر پایین‌تر از آن، امواج با طول موج بلند (به اختصار امواج بلند^۶) باعث ناپایداری ورقه مایع و سرانجام شکست آن می‌شوند. آنها در هر یک از رژیم‌های موج بلند و کوتاه رابطه انتشار جداگانه ارائه دادند و شرایط شکست مایع را پیش‌بینی کردند. مدل شکست اولیه ارائه‌شده توسط ایشان، که به LISA معروف می‌باشد، در همان سال توسط اشमित و همکاران به‌صورت یک مدل عددی پیاده‌سازی شد [۷]. ایشان برای شبیه‌سازی فرایند تمیزاسیون اسپری از کار تجربی پریش (۱۹۹۷)، که در فشار تزریق ۴/۸۶ بار انجام‌شده بود، استفاده کردند [۸]. نتایج به‌دست‌آمده تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی در هر دو بعد کمی و کیفی داشت. بعد از آن مدل LISA به بسته‌های عددی و نرم‌افزاری مربوط به شبیه‌سازی اسپری اضافه‌شده و بارها توسط محققان در فشارهای مختلف تزریق، مورد اطمینان‌سنجی قرار گرفت. شیم و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از مدل‌های ترکیبی شکست اولیه و ثانویه LISA و APTAB و همچنین تابع توزیع x^2 و دستگاه‌های PDA^۷ و LIEF^۸، اسپری مخروطی توخالی یک انژکتور پیچشی را در چند فشار محیط مختلف و در فشار تزریق ۵۱ بار به‌صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند [۹]. آنها به این نتیجه رسیدند که در فشار کاری مورد بررسی و در تمام فشارهای محیط، مدل ترکیبی آنها بهتر از مدل ترکیبی LISA و TAB مشخصات اسپری را پیش‌بینی می‌کند. بافکر و همکاران (۲۰۱۰) با به‌کارگیری مدل‌های LISA و TAB اسپری حاصل از ایزواکتان در فشارهای پاشش بالا (حدوداً ۳ تا ۶ مگاپاسگال) شبیه‌سازی و نتایج حاصل را با نتایج تجربی مقایسه کردند و نشان دادند که روش عددی آنها، که مبتنی بر ارائه کد متلب به نرم‌افزار فلونت بوده، به‌خوبی می‌تواند مشخصه‌های اسپری نظیر طول نفوذ، اندازه قطرات و شکل کلی اسپری را نشان دهد [۱۰]. البدای و همکاران (۲۰۱۵) آثار محیط را با توجه به آشفته‌بودن جریان گاز

(SMD) و سرعت قطرات استفاده کردند. نتایج آنها نشان می‌داد که سرعت قطرات با افزایش فاصله شعاعی از مرکز پاشش، افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. همچنین SMD نیز با فاصله گرفتن از مرکز پاشش، پیوسته افزایش می‌یابد. در این انژکتورها، قطراتی که دارای قطر کوچکتری هستند با سرعت کمتری حرکت می‌کنند. به عبارت دیگر قطرات با قطر بیشتر، سرعت و در نتیجه اندازه حرکت بزرگتری دارند. رادک (۲۰۱۲) با استفاده از سیستم PDA به بررسی تجربی انژکتورهای دوپایه مایع - مایع پرداخت [۱۶]. نتایج او نشان داد که پارامترهای هندسی از جمله قطر خروجی انژکتور و پارامترهای جریانی روی شکست صفحه مایع و قطر ذرات خروجی تأثیر مستقیم می‌گذارند. نتیجه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که کاهش عدد رینولدز، کاهش SMD ذرات را در پی خواهد داشت و با ماکزیم شدن سرعت جریان اسپری، SMD به کمترین مقدار خود خواهد رسید. همچنین راشاد و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی پارامترهای مختلف هندسی روی انژکتورهای پیچشی پرداختند [۱۷]. آنها به این نتیجه رسیدند که زاویه اسپری با افزایش نسبت طول محفظه پیچش انژکتور به قطر اوریفیس کاهش می‌یابد و SMD قطرات نیز با افزایش طول اوریفیس به قطر آن افزایش می‌یابد. اما انجام بررسی‌ها و مطالعات تجربی روی انژکتورها پرهزینه و مشکل خواهد بود، از اینرو بیشتر تحقیقات به این سمت گرایش پیدا کرده که قدرت حل عددی روی اسپری را به کمک نتایج تجربی نشان دهند که در مطالعات اخیر نیز از ترکیب روش عددی و تجربی جهت ارائه یک مدل حل عددی سازگار استفاده شده است. در بیشتر مطالعات عددی ذکر شده، بررسی اتمیزاسیون اسپری مخروطی شکل در فشارهای بالا (۳۰ تا ۶۰ بار) صورت گرفته است و تاکنون بیشتر شرایطی از شکست را مورد بررسی قرار داده‌اند که در آن رژیم موج کوتاه حاکم بوده و مدل شکست LISA را در فشارهای بالا، به کار گرفته‌اند؛ بنابراین با توجه به خلأ پژوهش‌های لازم در محدوده اسپری فشار پایین، هدف کار حاضر بررسی تجربی و عددی اسپری حاصل از انژکتور و همین‌طور به کارگیری مدل LISA در فشارهای پایین است.

در این تحقیق یک انژکتور پیچشی با استفاده از سیستم اندازه‌گیری لیزری PDA مورد بررسی تجربی قرار گرفته و نتایج آن با نتایج مدل‌سازی عددی مقایسه شده است و در نهایت پارامترهای مدل عددی شکست LISA و همچنین تابع توزیع

روی مشخصه‌های اسپری مورد بررسی قرار دادند و به این نکته پی بردند که شرایط محیط تأثیر بسیار زیادی روی مشخصه‌های اسپری می‌گذارد [۱۱]. در واقع هرچه آثار آشفستگی و اغتشاش محیط بیشتر باشد، فرایند اتمیزاسیون و تبخیر اسپری سوخت بهتر صورت می‌گیرد. همچنین آشفستگی باعث کاهش SMD قطرات، افزایش پهنای نفوذ اسپری و افزایش تعداد قطرات آن می‌شود. دینگ و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از روش LES-VOF مراحل اتمیزاسیون اسپری مخروطی در انژکتور پیچشی - فشاری را به صورت تجربی و عددی (در نرم‌افزار اوپن‌فوم) مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. ایشان اسپری حاصل را به سه منطقه فیلم مایع، لیگامنت و قطره تقسیم‌بندی کردند و در هر یک از این مناطق عوامل ناپایداری ورقه مایع و قطره را مورد بررسی قرار دادند. همچنین به این نتیجه رسیدند که اولین قطره‌های تشکیل شده دارای قطری بین ۱/۷ تا ۲ برابر قطر لیگامنت را دارند. نقی‌زاده و همکاران (۲۰۱۵) رفتار اسپری بیواتانول را در یک محفظه احتراق به کمک نرم‌افزار فایر^۱ تحلیل کردند [۱۳]. ایشان به بررسی تأثیر فشار تزریق سوخت و افزایش بیواتانول سوخت روی رفتار اسپری از جمله زاویه مخروطی اسپری، مساحت اسپری و SMD آن پرداختند و درنهایت با بررسی این کمیت‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش محسوس طول نفوذ اسپری و مساحت پاشش احتمال آنکه پاشش سوخت به دیواره‌های محفظه احتراق برخورد کند و در نتیجه آن مقدار هیدروکربن‌های نسوخته افزایش و بازده موتور کاهش یابد را افزایش می‌دهد. همچنین جان‌محمدی و همکاران (۲۰۱۴) به شبیه‌سازی عددی جریان داخل و خارج از انژکتور پیچشی - فشاری پرداختند. ایشان جریان داخل انژکتور به همراه مرحله اول اتمیزاسیون در رژیم جریان آرام و به کمک مدل LISA و مدلی دوفازی از ترکیب حجم سیال و تنظیم سطح، شبیه‌سازی کرده و در نهایت ضخامت فیلم مایع، زاویه اسپری و طول شکست محاسبه کردند [۱۴]. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی نشان از دقت روش مورد استفاده داشت. علاوه بر تحقیقات عددی ارائه شده، تاکنون بررسی‌های تجربی متنوعی نیز درباره انژکتورهای مارپیچی با استفاده از سیستم‌های اندازه‌گیری لیزری انجام شده است.

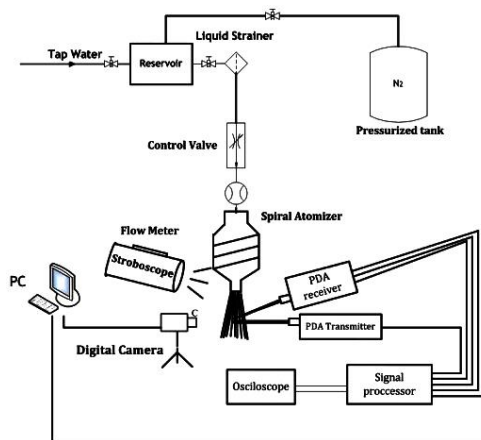
سلطانی و همکاران (۲۰۰۵) مطالعه‌ای تجربی روی SMD در انژکتورهای گریز از مرکز مماسی مایع - مایع انجام دادند [۱۵]. در این تحقیق از سیستم PDA برای اندازه‌گیری قطر میانگین ساوتر

برای انژکتورهای گریز از مرکز ماریچی در محدوده‌های فشاری پایین ارائه شده است.

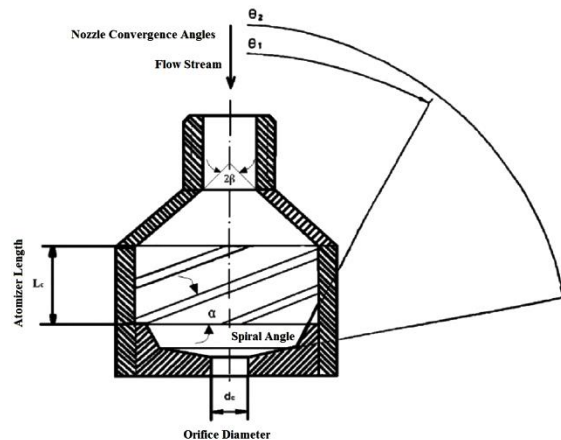
۲. تجهیزات آزمایشگاهی

در شکل ۱ ساختار انژکتور مورد مطالعه و پارامترهای مهم هندسی آن از جمله زاویه ماریچی، طول انژکتور، قطر اریفیس و زوایای همگرایی نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مهم‌ترین مشخصه‌های هندسی انژکتور ماریچی مقطع یا اریفیس خروجی به قطر d_c محفظه پیچش به طول L_c ماریچی درونی با زاویه α ، مخروط نازل با زاویه β و زوایای همگرایی نازل θ_1 و θ_2 هستند. اندازه‌گیری مشخصه‌های هیدرودینامیکی پاشش انژکتورهای پیچشی با هندسه‌های مختلف توسط دستگاه اندازه‌گیری PDA انجام شده است. این سیستم قطر، سرعت و غلظت قطرات را به صورت نقطه‌ای اندازه‌گیری می‌کند. سیال مورد آزمایش آب است و از یک مخزن ذخیره که به وسیله کپسول نیتروژن تحت فشار مناسبی قرار داده شده است، تأمین می‌گردد. شکل ۲ تجهیزات آزمایشگاهی را به صورت شماتیک نمایش

می‌دهد. این دستگاه لیزری از دقیق‌ترین ابزار اندازه‌گیری قطر و سرعت قطرات است. به‌طور کلی از سه روش جهت کالیبره کردن این سیستم استفاده می‌شود. در روش اول فیبرهای نوری با قطرهای ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میکرومتری را به‌طور مجزا به یک فن متصل می‌شود. با چرخش فن و عبور متوالی این فیبرها از محل تقاطع پرتوهای لیزری، سیستم، قطر و سرعت و تعداد دفعات عبور این فیبرها را اندازه‌گیری می‌کند. با مشخص بودن سرعت دورانی فن، سرعت عبور فیبر و تعداد دفعات عبور در یک زمان مشخص قابل محاسبه است. با مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده و قابل انتظار می‌توان دقت اندازه‌گیری دستگاه از نظر قطر ذره، سرعت و تعداد دفعات اندازه‌گیری بررسی و کالیبره کرد. در روش دوم از یک پودر مونو سایز استفاده می‌شود. با پاشش این پودر به فضای داده‌برداری دستگاه می‌توان دقت این سیستم را در اندازه‌گیری قطر قطرات محاسبه کرد. در روش سوم از دستگاه‌های تولید رطوبت^{۱۱} استفاده می‌شود. این دستگاه‌ها قطرات مونو سایزی با دقت بالا تولید می‌کنند که می‌توان به کمک آن دقت دستگاه در اندازه‌گیری قطر قطرات را محاسبه کرد.



شکل ۲. چیدمان آزمایشگاهی مورد استفاده



شکل ۱. ساختمان انژکتور ماریچی

نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج در محدوده قابل قبولی هستند.

به‌منظور داده‌برداری، انژکتورها در داخل فیکسچر^{۱۱} مخصوص قرار گرفته و این فیکسچر نیز روی دستگاه Travers سیستم PDA، که یک مکانیزم حرکتی سه‌بعدی دارد، نصب شده است. کنترل Travers و حرکت دادن آن به‌وسیله کامپیوتر متصل به دستگاه PDA به‌طور دستی یا از طریق برنامه‌های ذخیره‌شده در آن امکان‌پذیر می‌گردد. برای هر یک از انژکتورها مسیر ویژه‌ای در

این سیستم به‌کمک روش اول و دوم کالیبره شده و دقت بالایی در اندازه‌گیری دارد. علاوه بر کالیبره کردن دستگاه بررسی تکرارپذیری نتایج نیز ضروری است. بدین‌منظور هر تست با ثابت نگه‌داشتن شرایط آزمایشگاهی چند بار اندازه‌گیری شد و نتایج با خطای $\pm 5\%$ درصد به‌دست آمد. این موضوع نشان می‌دهد که تست‌ها از نظر دقت تجربی و تکرارپذیری نیز قابل‌قبول هستند. به‌عنوان نمونه اندازه‌گیری SMD قطرات در انژکتور مینا (تست ۱) در شرایط آزمایشگاهی ثابت، ۵ مرتبه متوالی اندازه‌گیری شد و

آن گذر نمایند، سرعت افقی محاسبه شده، میانگین مؤلفه‌های از سرعت ذرات است که مماس بر دایره پاشش می‌باشد و برعکس هرگاه پرتوهای لیزر مماس بر دایره مسیر حرکت Travers قرار گیرند، سرعت افقی نشان‌دهنده میانگین مؤلفه‌های شعاعی سرعت ذرات گذر کرده از حجم اندازه‌گیری می‌باشد. پس از پایان فرایند داده‌برداری از اسپری هر آنکتور، پردازش داده‌های خام به وسیله واحد پردازنده سیستم PDA و کامپیوتر متصل به آن انجام شده و قابل دسترس خواهد بود. مشخصات هندسی آنکتورهای بررسی شده در هر تست، در جدول ۲ ارائه شده است. به منظور بررسی اثر تغییرات هر پارامتر هندسی بر SMD قطرات، یک آنکتور پیش‌ساخته به عنوان آنکتور مبنا در نظر گرفته می‌شود. آنکتور ۱ و آنکتور ۴ آنکتورهای مبنا هستند. مثلاً با ثابت نگه داشتن زاویه ماریج و طول آنکتور مبنای ۴، می‌توان تنها قطر اریفیس را تغییر داده تا اثر این پارامتر هندسی بر کیفیت اسپری و SMD قطرات مشخص شود. ذکر این نکته ضروری است که آنکتور مبنای ۴ نسبت به آنکتور مبنای ۱ اسپری مخروطی جمع‌تری داشته و زاویه پاشش کمتر می‌باشد. از اینرو نقاط داده‌برداری از آنکتور مبنای ۱ تا شعاع‌های بیشتری (۵۶ میلی‌متر) داده‌برداری شده تا یال‌های کناری اسپری را نیز پوشش دهد.

جدول ۲. شرایط هندسی آنکتورهای مورد استفاده در کار تجربی

شماره آنکتور	قطر اوریفیس d_c (mm)	زاویه ماریج α (degree)	طول آنکتور L_c (mm)
۱	۲/۱	۱۵	۶
۲	۲/۱	۲۵	۶
۳	۲/۱	۳۵	۶
۴	۲/۵	۲۱	۶
۵	۳	۲۱	۶
۶	۳/۵	۲۱	۶
۷	۴	۲۱	۶

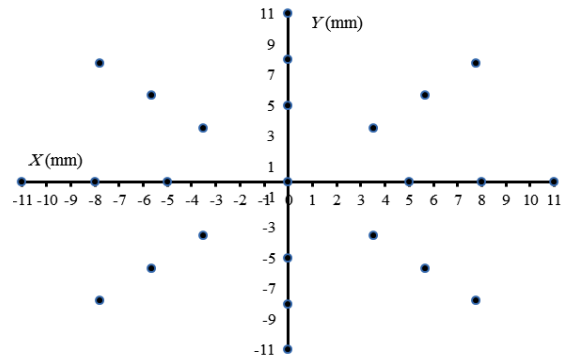
۳. مدل‌ها و روابط ریاضی

به منظور بررسی عددی اسپری آنکتورها و مطابقت آن با نتایج تجربی از آنکتورهای ۱ و ۷ جدول ۲ (به دلیل داشتن نتایج بهتر از جمله توزیع قطرات در این دو حالت) استفاده شده است که به ترتیب تست‌های شماره ۱ و ۲ نامگذاری شده‌اند. شرایط هندسی

کامپیوتر تعریف شده که حرکت Travers را در سه دایره هم‌مرکز با شعاع‌های متفاوت، که تقریباً تمام مقاطع افقی اسپری را در فاصله ۳ سانتی‌متری از خروجی آنکتور دربر می‌گیرند، امکان‌پذیر می‌سازد. آنکتور متصل به دستگاه Travers ضمن پیمایش این سه دایره، در هشت نقطه با فواصل ۴۵ درجه توقف نموده و امکان داده‌برداری را برای دستگاه PDA فراهم می‌سازد. نقطه آغازین داده‌برداری مرکز دایره بوده و پس از آن سه دایره به شعاع‌های ۵، ۸ و ۱۱ میلی‌متر در جهت مثلثاتی پیموده می‌شوند؛ بنابراین مجموعاً از ۲۵ نقطه متفاوت در اسپری‌ها نمونه‌برداری شده است. در شکل ۳ نقاط داده‌برداری شده از یک مقطع مخروط اسپری پاشش نمایش داده شده است.

جدول ۱. بررسی تکرارپذیری اندازه‌گیری داده‌ها در تست ۱

دفعات اندازه‌گیری	قطر میانگین ساوتر قطرات	درصد خطا
۱	۷۲/۵	-
۲	۷۵	۳/۵
۳	۷۴/۲۵	۲/۴
۴	۷۰/۵	۲/۷۵
۵	۶۹	۴/۸۵



شکل ۳. نقاط داده‌برداری با کمک سیستم PDA

حرکت دایره‌ای دستگاه Travers درون مخروط پاشش این امکان را فراهم می‌کند که علاوه بر عدم قابلیت دستگاه PDA موجود در اندازه‌گیری مؤلفه سوم سرعت ذرات یا همان مؤلفه در امتداد محور اپتیکی دستگاه، بتوان میانگین این مؤلفه را نیز به طور همزمان از مقادیر اندازه‌گیری شده محاسبه کرد و سپس سرعت افقی میانگین را استخراج نمود. بدین ترتیب هرگاه مخروط پاشش به نحوی استقرار یابد که پرتوهای لیزر از مرکز دایره سطح مقطع

و آزمایشگاهی که به‌عنوان ورودی به مدل عددی استفاده شده، در جدول ۳ ارائه شده است. در بررسی جریان‌های چندفازی به‌طور کلی دو رویکرد اویلری - لاگرانژی و اویلری - اویلری وجود دارد. در روش اویلری - لاگرانژی (که به مدل فاز مجزا یا DPM^{۱۲} نیز معروف است) فاز سیال با معادلات ناویر - استوکس حل می‌شود، در حالی که فاز مجزا به‌وسیله ردیابی^{۱۳} تعداد زیادی ذرات، حباب‌ها یا قطرات محاسبه می‌شود. در این روش، فاز مجزا

می‌تواند مومنتوم، جرم و انرژی سیال را تغییر دهد. در این تحقیق نیز از مدل اویلری - لاگرانژی جهت شبیه‌سازی فرایند پاشش و اسپری استفاده شده است؛ زیرا این روش بهترین و مؤثرترین راه در بررسی و مدلسازی فرایند اسپری است [۱۸]. بر این اساس، در معادلات حاکم، زیرنویس d بیانگر خاصیت مربوط به فاز مجزا یا قطرات و زیرنویس g بیانگر خاصیت مربوط به فاز پیوسته یا گاز است.

جدول ۳. شرایط هندسی و آزمایشگاهی آنزکورتورها در مطالعه عددی

دبی جرمی \dot{m} (gr/sec)	فشار تزریق P_{inj} (bar)	طول آنزکورتور L_c (mm)	زاویه ماریج α (degree)	قطر اوریفیس d_c (mm)	تست
۲۴/۲	۱۰/۵	۶	۱۵	۲/۱	۱
۲۰/۲۸	۶/۲	۶	۲۱	۴	۲

۳-۱. معادلات حاکم بر فاز اویلری (گاز)

شبیه‌سازی CFD با اعمال معادلات ریاضی و مدل‌های عددی روی جریان سیال انجام می‌شود. معادلات بقای جرم، مومنتوم حاکم بر فاز سیال به‌صورت زیر هستند.

$$\frac{\partial(\rho_g u_j^g)}{\partial x_i} = 0 \quad (۱)$$

$$\rho_g \frac{\partial u_i^g}{\partial t} + \rho_g u_j^g \frac{\partial u_i^g}{\partial x_j} = \quad (۲)$$

$-\frac{\partial p_g}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_j \frac{\partial u_i^g}{\partial x_j} \right) - \frac{1}{\rho_g} M_p + F$
در این معادلات نیروی خارجی F ، نیرویی است که به‌واسطهٔ تقابل با فاز ذرات به‌وجود می‌آید. همچنین ρ_g و μ_g چگالی و ویسکوزیتهٔ مؤثر فاز گاز، M_p مومنتوم تبادل شده و u سرعت جریان است.

۳-۱-۱. معادلات حاکم بر آشفستگی و مدل آشفستگی

آشفستگی به‌واسطهٔ حرکت اغتشاشی ذرات مایع در محیط گازی به‌وجود می‌آید. اگرچه معادلات بقا همچنان برای توصیف حرکت سیال قابل اجرا هستند، اما قادر به مدلسازی ماهیت نوسانی و اغتشاشی سیال نیستند. به‌همین دلیل در این تحقیق از مدل $k-\epsilon$ realizible جهت مدلسازی پدیدهٔ اغتشاش به‌واسطهٔ حرکت ذرات مایع در فضای گازی استفاده شده است که با توجه به پژوهش فوگلیاتی (۲۰۰۶) این مدل توربولانسی در محدودهٔ

اسپری‌های فشار پایین به‌خوبی رفتار اسپری را پیش‌بینی می‌کند [۱۹]. این مدل توسط شیه و همکاران (۱۹۹۴) بر مبنای مدل $k-\epsilon$ RNG اما با یک معادلهٔ جدید برای ویسکوزیتهٔ آشفستگی توسعه داده شد [۲۰]. معادلات انتقال انرژی جنبشی آشفستگی (k) و نرخ اضمحلال (ϵ) به ترتیب مطابق با معادلات ۳ و ۴ می‌باشد.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho k + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho k u_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_{turb}}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (۳)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho \epsilon u_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_{turb}}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \rho C_1 S_\epsilon - \rho \rho_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} P_b + S_\epsilon \quad (۴)$$

در این روابط، ثابت به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند.

$$C_{1\epsilon} = 1.44$$

$$C_2 = 1.9$$

$$\sigma_k = 1.0$$

$$\sigma_\epsilon = 1.2$$

همچنین لزجت دنباله براساس انرژی آشفستگی و نرخ اتلاف آن به‌صورت رابطهٔ ۵ محاسبه می‌شود، که در آن C_μ براساس رابطهٔ ۶ محاسبه می‌شود.

$$\mu_{turb} = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (۵)$$

$$C_\mu = \rho \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\epsilon}} \quad (۶)$$

همچنین در رابطه ۱۴، \bar{F} نماینده ترمهای شتابی اضافی و نیروهای اضافی از جمله نیروی گرادیان فشار، نیروی جرم مجازی، نیروی باست، اثرات مگنس، نیروی سافمن و فاکسن است. در پروژه حاضر، با توجه به اینکه سیال آب در محیط (هوا) اسپری شده است، نسبت چگالی گاز به قطره بسیار کوچک است و می‌توان از نیروهای جرم مجازی، گرادیان فشار، سافمن و فاکسن صرف‌نظر کرد. اگر اوال و پنگ (۱۹۹۴) نشان دادند تا زمانی که نسبت چگالی ذره به چگالی سیالی که در آن غوطه‌ور است از ۲۰ بیشتر باشد، می‌توان از نیروهای باست و جرم مجازی صرف‌نظر کرد [۲۱]. همچنین به علت مهم نبودن چرخش قطرات اسپری در محیط نیروی برای مگنس و اثرات مگنس نیز قابل‌اغماض است [۲۲]. با فرض ثابت‌ماندن ترمهای شامل نیروهای حجمی در طول گام‌های زمانی کوچک و خطی‌سازی دیگر نیروهای اعمالی روی قطره، معادله مسیر ساده‌شده به شکل زیر خواهد بود.

$$\frac{du_d}{dt} = \frac{1}{\tau_d}(u_g - u_d) + g \quad (17)$$

به طوری که τ_p در آن پاسخ زمانی مومنتوم است. یکی از پارامترهای اصلی در شبیه‌سازی اسپری، انتخاب گام زمانی حل است که باید براساس پاسخ زمانی مومنتوم و از معادله حرکت قطرات استخراج شود. در واقع گام زمانی حل باید از مقدار پاسخ زمانی مومنتوم و مشخصه‌های زمانی شکست هر الگوی شکست، کوچکتر باشد تا بتواند جزئیات پدیده را دنبال کند. مقدار پاسخ زمانی مومنتوم از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\tau_p = \frac{4}{3} \times \frac{2\rho_d r}{C_{drag}|u_g - u_d|} \quad (18)$$

در این تحقیق، با توجه به اینکه مقدار پاسخ زمانی مومنتوم در تست‌های اول و دوم به ترتیب ۴/۶ و ۴/۷۳ میکروثانیه بوده، مقدار گام زمانی برابر با یک میکروثانیه انتخاب شده است.

۲-۲-۳. مدل شکست اولیه

یشمیت و همکاران (۱۹۹۹) با بسط یک مدل، فروپاشی اولیه اسپری‌های مخروطی توخالی را به خوبی توصیف کردند [۷]. آنها ابتدا رویکردی صفر بعدی را برای توصیف جریان داخلی نازل و تعیین سرعت در خروجی مورد استفاده قرار دادند. با استفاده از این مدل، در ابتدا سرعت خروجی نازل بر اساس رابطه برنولی و مطابق با معادله ۱۹ تعیین می‌شود:

در این رابطه $A_0=4.04$ و دیگر پارامترهای موجود در آن مطابق با روابط ۷ تا ۱۱ تعیین می‌شوند.

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{Q}_{ij}\tilde{Q}_{ij}} \quad (7)$$

$$\tilde{Q}_{ij} = Q_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (8)$$

$$A_s = \sqrt{6} \cos\varphi \quad (9)$$

$$\varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\sqrt{6} \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\bar{S}^3} \right) \quad (10)$$

$$\bar{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad (11)$$

در این روابط S بیانگر تانسور تغییر شکل المان سیال و Ω تانسور چرخش المان سیال هستند. همچنین P_b و P_k که به ترتیب، تولید انرژی جنبشی آشفتگی و آثار بویانسی را به معادلات وارد می‌کنند، به صورت روابط ۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شوند.

$$P_k = -\rho u'_i u'_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (12)$$

$$P_b = \beta g_i \frac{\mu_{tur}}{\rho \Gamma_{tur}} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (13)$$

۲-۳. معادلات حاکم بر فاز لاگرانژی (مایع)

در روش اولیری - لاگرانژی استفاده شده فرض می‌شود فاز ذرات (قطرات اسپری) کروی شکل بوده و در فاز پیوسته (فاز گاز) پراکنده می‌شوند و معادلات انتقال فاز ذرات در چارچوب مرجع لاگرانژی محاسبه می‌شوند.

۱-۲-۳. ردیابی مسیر ذرات

ردیابی فاز ذرات با برقراری تعادل نیروهای اعمال شده شامل اینرسی، نیروی و نیروی گرانش روی قطرات مطابق با رابطه ۱۴ انجام می‌شود که در آن F_{drag} نیروی پسای وارد بر قطره است که به صورت ۱۵ تعریف می‌شود.

$$\frac{du_d}{dt} = F_{drag}(u_g - u_d) + \frac{\bar{g}(\rho_g - \rho_d)}{\rho_d} + \bar{F}' \quad (14)$$

$$F_{drag} = \frac{18u_d}{\rho_d d_d^2} + \left(\frac{C_{drag} Re_d}{24} \right) \quad (15)$$

در رابطه مذکور نیز d_d قطر قطره، C_{drag} ضریب پسا و Re_d عدد رینولدز قطره است که براساس رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود.

$$Re_d = \frac{\rho d_d}{\mu} |u_g - u_d| \quad (16)$$

ورقه می‌گردد. در این مدل براساس پژوهش‌های هاگرتی و شای [۲۵] عدد وبر بحرانی ۱۶۸۷۵ معرفی شده که تعیین‌کننده موج غالب بر ورقه مایع است و بدین ترتیب در اعداد وبر بالا و پایین آن، رابطه انتشار حاصل شده و طول شکست بر این اساس تعیین می‌گردد. اگر امواج ناپایدار روی سطح ورقه به دامنه بحرانی برسند، ورقه به رباط^{۱۴}های مایع شکسته می‌شود. چون رشد امواج مستقل از ضخامت ورقه است، زمان فروپاشی τ_b و طول متناظر فروپاشی L_b را می‌توان براساس شبیه‌سازی با فروپاشی جت مایع استوانه‌ای، فرمول‌بندی کرد. در عددهای وبر بالاتر از عدد وبر بحرانی ۱۶۸۷۵ که امواج کوتاه روی سطح ورقه رشد می‌کنند، خواهیم داشت:

$$L_b = U_{inj} \tau_b = U_{inj} \frac{C_\tau}{\omega_{max}} \quad (22)$$

در این رابطه، $C_\tau = \ln(\eta_b / \eta_0)$ ثابت شکست ورقه بوده و براساس نتایج تجربی برابر با ۱۲ در نظر گرفته می‌شود [۲۶]. چنانچه h نصف ضخامت ورقه هنگام شکست باشد، در این حالت رباطهای استوانه‌ای ایجادشده قطری برابر با d_L خواهند داشت که مطابق با رابطه ۲۳ تعیین می‌گردند.

$$d_L = \sqrt{\frac{16h}{k_{max}}} \quad (23)$$

در اعداد وبر پایین‌تر از ۱۶۸۷۵ نیز طول شکست ورقه و قطر رباطهای مایع به ترتیب از روابط ۲۴ و ۲۵ تعیین می‌گردند.

$$L_b = U_{inj} \tau_b = U_{inj} \left((3C_\tau)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{J\sigma}{Q^2 U_{inj}^4 \rho} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \quad (24)$$

$$d_L = \sqrt{\frac{8h}{k_{max}}} \quad (25)$$

که در آنها $J = ht$ و k_{max} عدد موج متناظر با بیشترین نرخ رشد امواج اغتشاشی (ω_{max}) است. بعد از شکست اولیه ورقه و تبدیل آن به رباطهایی با قطر d_L در نهایت اولین قطره حاصل از اتمیزاسیون با قطر d_D و مطابق با معادله ۲۶ حاصل می‌شود.

$$d_D = 1.88 d_L (1 + 30h)^{\frac{1}{6}} \quad (26)$$

در این رابطه، $0h$ عدد بی‌بعد آنسگ بر پایه قطر رباطهای مایع و برابر با $\mu_L / \sqrt{\rho_l \sigma d_L}$ است. از مقدار قطر قطرات بعد از شکست اولیه، به‌عنوان شرایط ورودی به محاسبات CFD استفاده می‌شود. بسته‌ها به یک مخروط توخالی با زاویه متوسط θ

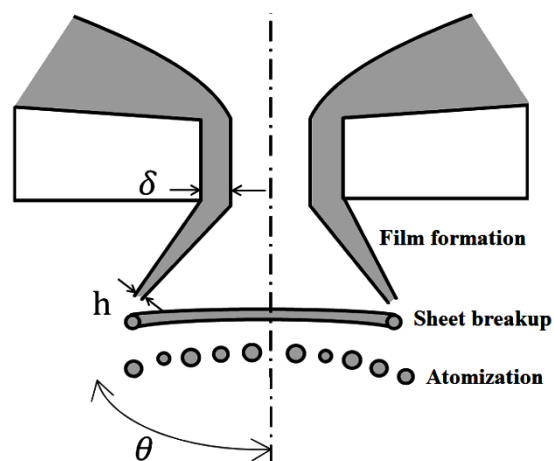
$$\tau_p = C_{dis} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (19)$$

در این رابطه C_{dis} ضریب تخلیه است و با توجه به مراجع [۲۳-۲۴] برای انژکتورهای ماریچی عددی بین ۰/۳ تا ۰/۵ است. مؤلفه سرعت محوری (V) نیز از رابطه $V = U_{inj} \cos(\theta)$ به‌دست می‌آید که در آن θ نیم‌زاویه مخروط معلوم فرض می‌شود. در نهایت با استفاده از رابطه دبی می‌توان ضخامت فیلم مایع (δ) را مطابق با رابطه ۲۰ به‌دست آورد.

$$\dot{m} = \pi \eta V \delta (-\delta) \quad (20)$$

در این رابطه، D قطر خروجی نازل و \dot{m} نرخ جریان جرمی است. فرایند تولید اسپری از خروجی نازل تا قطرات ریز کاملاً توسعه‌یافته، مطابق شکل ۴ طی سه مرحله صورت می‌گیرد:

۱. تشکیل فیلم مایع
۲. فروپاشی مایع
۳. تجزیه به قطرات



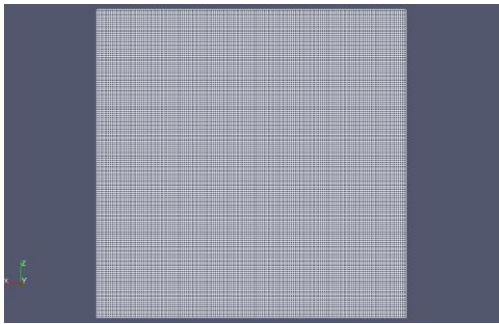
شکل ۴. مراحل گذار از جریان نازل به اسپری کاملاً توسعه‌یافته

در مدل ارائه‌شده توسط سنکال [۶] فرض می‌شود که یک ورقه دوبعدی، لزج و تراکم‌ناپذیر، با ضخامت $2h_0$ و با سرعت U_{inj} به گاز ساکن، غیرلزج و تراکم‌ناپذیر نفوذ می‌کند. یک طیف از اغتشاشات بسیار کوچک به‌صورت رابطه ۲۱ به ورقه اعمال می‌شود که تولید نوسانات سرعت و فشار در مایع و گاز را در پی دارد.

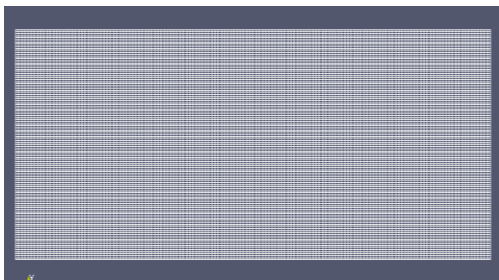
$$\eta(t) = \eta_0 \exp(ik_w x + \omega t) \quad (21)$$

همچنین η_0 دامنه اولیه موج، $k_w = 2\pi/\lambda$ عدد موج و $\omega = \omega_r + i\omega_i$ نرخ موهومی رشد است. فرض می‌شود که ماکزیمم نرخ رشد ω_{max} (ناپایدارترین نرخ رشد) باعث فروپاشی

اعمالی، از چنین هندسه سه‌بعدی بهره گرفته شده که در غیر این صورت مسلماً استفاده از یک هندسه به صورت متقارن محوری و حل تنها یک قطاع ۵ درجه از حجم محاسبات می‌کاست. شبکه‌بندی میدان محاسباتی در مقاطع مختلف در شکل ۵ نمایش داده شده است. این هندسه با شبکه‌بندی سازمان‌یافته به کمک ابزار blockMesh در نرم‌افزار اوپن‌فوم ایجاد شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۵. شبکه‌بندی میدان محاسباتی
الف) نمای از بالا، ب) نمای از روبرو

شرط مرزی در همهٔ وجوه از نوع دیوار حاکم بوده و دمای آنها نیز ۲۹۸ کلوین تنظیم شده است. با توجه به اینکه اسپری حاصل به صورت یک مخروط توخالی است، زوایای داخلی و خارجی در مدل‌سازی براساس نتایج تست قرار داده شده است. با استفاده از نتایج تجربی و مقادیر مؤلفه‌های سرعت قطرات، مقدار نیم زاویهٔ خارجی مخروط اسپری برای تست‌های اول و دوم به ترتیب ۶۰ و ۵۰ درجه و مقدار نیم‌زاویهٔ داخلی مخروط اسپری برای تست‌های اول و دوم به ترتیب ۳۱ و ۲۰ درجه می‌باشد. در شبیه‌سازی حاضر از مدل‌های LISA و TAB جهت مدل‌سازی شکست‌های اولیه و ثانویه استفاده شده است. با توجه به اینکه در تست اول مشخصه‌های زمانی الگوهای شکست اولیه و ثانویه به ترتیب ۱/۹ و ۲/۸ میکروثانیه و برای تست دوم نیز به ترتیب ۱/۸۴ و ۱/۲ میکروثانیه می‌باشد، گام زمانی انتخاب شده (۱ میکروثانیه) به خوبی می‌تواند پدیده‌های موجود را دنبال کند. مدت زمان شبیه‌سازی نیز

از محور اسپری و با توزیع تصادفی در محدودهٔ کمان با زاویهٔ $\theta \pm \Delta\theta$ پاشیده می‌شوند و در معرض هیچ‌گونه نیروی درگ، فروپاشی، تبخیر یا برخورد قرار نمی‌گیرد تا اینکه فاصلهٔ آنها از اوربیس برابر یا بزرگتر از طول فروپاشی L_b گردد. در نقطهٔ فروپاشی به بسته‌ها توزیعی مطابق با تابع توزیع احتمال رزین - راملر^{۱۵} مطابق با رابطهٔ ۲۷ داده می‌شود و از این نقطه به بعد، بسته‌ها به صورت عادی رفتار می‌کنند و در معرض شکست ثانویه، نیروهای اثرودینامیکی، فرایندهای فروپاشی و برخورد قرار می‌گیرند.

$$f(d) = \frac{nd^{n-1}}{D^n} \exp\left(-\left(\frac{d}{D}\right)^n\right) \quad (27)$$

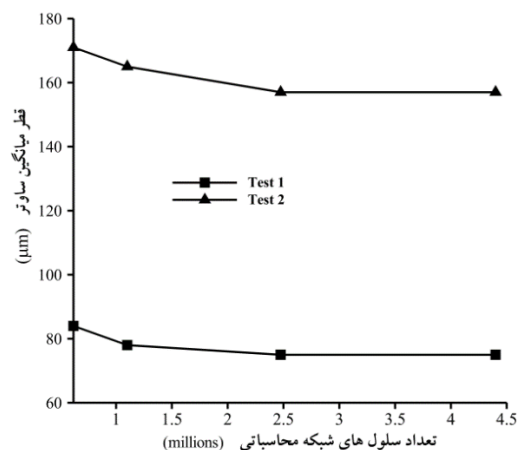
در رابطهٔ ۲۷، n ضریب توزیع بوده و براساس نتایج تجربی حاصل می‌شود. این پارامتر هم معمولاً برابر با ۳/۵ در نظر گرفته می‌شود [۳]. همچنین \bar{D} یا قطر مشخصه، برحسب d_D به صورت رابطهٔ ۲۸ تعریف می‌شود.

$$\bar{D}^n = \frac{d_D^n}{\ln 2} \quad (28)$$

۴. شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی صورت گرفته در این تحقیق به کمک نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم انجام شده است. این نرم‌افزار دارای کتابخانه‌های متعدد به زبان برنامه‌نویسی ++C جهت شبیه‌سازی انواع مسائل مربوط به جریان‌های آرام و آشفته، یکفاز و چندفاز، انتقال حرارت، واکنش‌های شیمیایی و مکانیک جامدات است. یکی از امکانات مهم این نرم‌افزار آزادی عملی است که به کاربر در راستای ویرایش و تغییر کد محاسباتی موجود بنا بر هدف مورد نظر می‌دهد [۲۷]. در این مقاله نیز چون محاسبات قطر میانگین ساوتر SMD، سرعت و غلظت اسپری در صفحهٔ ۳ سانتی‌متری از دهانهٔ انژکتور اندازه‌گیری شده و نرم‌افزار به طور پیش‌فرض قادر به استخراج این نتایج در چنین مقطع عرضی نیست، جهت استخراج این اطلاعات، کدی به زبان ++C نوشته و این قابلیت به حلگر SprayFoam اضافه شده است. مدل‌سازی حرکت ذرات اسپری در محیط گازی به کمک روش اوپلری - لاگرانژی در فضایی مکعبی شکل به ارتفاع ۱۱ و طول و عرض ۳۰ سانتی‌متر (جهت اطمینان از عدم برخورد اسپری به دیواره) صورت گرفته است که انژکتور نیز دقیقاً در مرکز وجه بالا قرار دارد. با توجه به نوشتن کد جهت استخراج نتایج در صفحهٔ عرضی و تفهیم هندسهٔ مشخص به کد

براساس زمان پایدار شدن و ثابت ماندن نتایج مانند SMD در صفحه تعیین شده و بر این مبنای پاشش به مدت ۱/۵ میلی ثانیه از آغاز تزریق در گاز امتداد می‌یابد. همچنین تصحیح فشار از الگوریتم پیمیل^{۱۶}، گسسته‌سازی ترم‌های زمانی از روش اولر مرتبه اول و گسسته‌سازی سایر جملات از روش گاوس مرتبه دوم صورت گرفته است. در شبیه‌سازی عددی همچنین از برخورد قطرات صرف‌نظر شده است. برآوردی کیفی و معیار کلی که در این باره وجود دارد این است که چنانچه مقدار پاسخ زمانی مومنتوم از زمان برخورد بین قطرات بزرگتر باشد جریان اسپری چگال و در غیر این صورت رقیق خوانده می‌شود. با توجه به اینکه بر این مبنای اسپری در پژوهش حاضر رقیق است، نیازی به مدل کردن برخورد بین قطرات نیست. بررسی استقلال نتایج از مش بندی، برای چهار شبکه محاسباتی مختلف با تعداد سلول‌های ۶۱۸۷۵۰، ۱۱۰۰۰۰، ۲۴۷۵۰۰ و ۴۴۰۰۰۰ بررسی شده است. چون پارامتر SMD در مشخصات اسپری بسیار حائز اهمیت است، از مقادیر این پارامتر در مدل‌سازی هر دو تست، جهت اطمینان از عدم وابستگی نتایج به شبکه استفاده شده و نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج شکل ۶ نشان می‌دهد بعد از افزایش تعداد سلول‌های شبکه از ۲۴۷۵۰۰ به ۴۹۵۰۰۰ تغییر چندانی در نتایج حاصل نشده است. به همین دلیل از شبکه‌ای با تعداد سلول ۲۴۷۵۰۰ (جهت کاهش زمان محاسبات) استفاده شده است.



شکل ۶. بررسی استقلال نتایج از شبکه

در مجموعه شبیه‌سازی‌های عددی صورت‌گرفته روی اسپری همواره مفهومی بنام بسته^{۱۷} قطرات مطرح می‌شود که این بسته‌ها در واقع مجموعه‌ای از قطرات با دما، قطر و سرعت یکسان هستند که در کد حل معرفی می‌شوند. در این شبیه‌سازی، مجموعه

قطرات مایع در غالب یک مجموعه ۲ میلیون بسته‌ای به کد اعمال شده‌اند. سیال مورد استفاده در تمام تست‌ها آب با چگالی ۹۹۸ کیلوگرم بر متر مکعب، لزجت ۰/۰۰۱۰۰۳ کیلوژول بر کیلوگرم کلویین و کشش سطحی ۰/۰۷۲ نیوتن بر متر بوده که به محیط با فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال پاشش می‌شود.

۵. نتایج

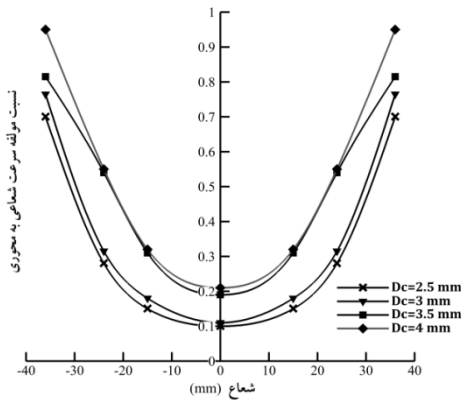
۵-۱. نتایج تجربی

نتایج تجربی نشان می‌دهد که نقاط دایره میانی اندازه‌گیری از بیشترین مقدار غلظت برخوردار هستند. این نتیجه با توجه به شکل مخروطی توخالی اسپری قابل پیش‌بینی بود. نمودار تغییرات غلظت قطرات در راستای شعاع پاشش در شکل ۷ نمایش داده شده است. این نمودار براساس نتایج حاصل از تست انژکتور شماره ۱ به‌عنوان انژکتور مینا در خط عمود بر صفحه عرضی در فاصله ۳ سانتی‌متری از دهانه انژکتور به‌دست آمده است. این نمودار نیز شکل مخروطی اسپری را نشان می‌دهد.

۵-۱-۱. تأثیر تغییرات قطر خروجی انژکتور

بهمنظور بررسی تأثیر قطر اریفیس خروجی انژکتور بر مشخصه‌های پاشش، چهار انژکتور با قطرهای اریفیس خروجی ۲/۵، ۳، ۳/۵ و ۴ میلی‌متر (انژکتورهای شماره‌های ۴ تا ۷) در شرایط آزمایشگاهی برابر مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج اندازه‌گیری‌های حاصل از PDA نشان داد با افزایش قطر اریفیس، مؤلفه‌های محوری و شعاعی سرعت ذرات کاهش می‌یابند و تنها مؤلفه‌های مماسی سرعت افزایش پیدا می‌کند، اما با توجه به مقدار ناچیز این مؤلفه در برابر دو مؤلفه دیگر، سرعت کلی مجموع ذرات که برآیند این سه مؤلفه است، کاهش می‌یابد. در اریفیس خروجی انژکتور به‌دلیل تغییر مجرای عبوری از اندازه بزرگ آن در محفظه پیچش انژکتور به‌اندازه کوچک آن در مقطع اریفیس خروجی، فشار استاتیک تا اندازه زیادی افت کرده و با صرف‌نظر از تلفات اصطکاکی، به‌طور کامل به فشار دینامیک تبدیل می‌گردد. در نتیجه در خروج از اریفیس، فشار کمتر و سرعت بیشتری مشاهده می‌شود. میزان این کاهش فشار و افزایش سرعت بستگی به قطر روزنه اریفیس دارد که هرچه کوچکتر باشد، اختلاف مذکور مقدار بزرگتری است؛ بنابراین انژکتوری که دارای قطر اریفیس کوچکتری است دارای بیشترین سرعت ذرات می‌باشد. نتایج به‌دست آمده از آزمایش تطابق کاملی با این واقعیت دارد. کاهش

اسپری حاصل از انژکتورهای دارای قطر اریفیس بزرگتر، زاویه مخروط کوچکتري داشته باشد. در شکل ۸ تغییرات نسبت سرعت شعاعی به محوری در راستای شعاع، برحسب تغییرات قطر اریفیس نشان داده شده است.



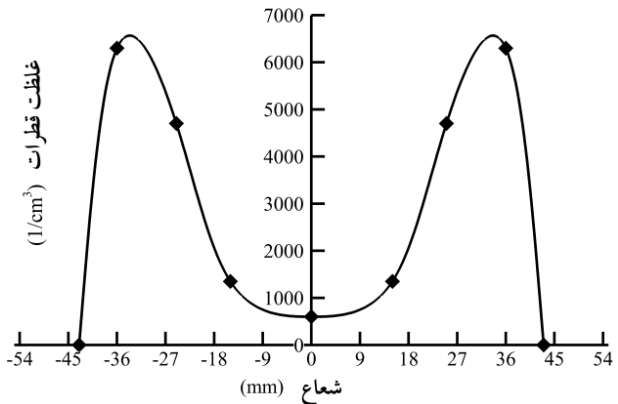
شکل ۸. تغییرات نسبت سرعت شعاعی به محوری در قطر اریفیس

می‌کند؛ زیرا با افزایش ۲۰ درجه‌ای زاویه ماریچ، SMD قطرات تنها حدوداً ۵ میکرون کاهش می‌یابد.

۵-۲. نتایج شبیه‌سازی عددی

در این تحقیق به منظور تطابق نتایج تجربی و عددی و با توجه به اینکه پارامترهای C_T از مدل شکست اولیه LISA و n از تابع رزین - راملر کمیت‌هایی تجربی هستند و با استفاده از آن نتایج تجربی تعیین می‌گردند [۳ و ۲۶]، پس باید ثوابت مدل‌سازی مورد بررسی قرار گرفته و بهترین مقدار آنها تعیین گردد. کمیت C_T یا ضریب شکست اولیه در مدل LISA تأثیر به‌سزایی بر طول شکست اولیه و رریاله مایع دارد؛ زیرا نقش شرایط اولیه را برای تولید اسپری ایفا می‌کند. به این ترتیب این کمیت روی ساختار کلی اسپری حاصل از شبیه‌سازی مؤثر خواهد بود. اگرچه مقدار کمیت C_T در کاربردهای فشار بالا همواره ۱۲ به‌دست‌آمده، اما این پارامتر یک پارامتر به نتایج تجربی وابسته بوده و به کمک نتایج تجربی تعیین می‌شود. در این مقاله با مقایسه نتایج سرعت و قطر میانگین ساوتر در کارهای تجربی و عددی مقدار این کمیت برای تست‌های اول و دوم به ترتیب برابر با ۵ و ۳ تعیین گردید. همان‌طور که در قسمت‌های قبل گفته شد، تابع رزین - راملر بعد از مدل شکست اولیه معتبر بوده و توزیع اندازه قطرات را مشخص

مؤلفه‌های شعاعی و محوری سرعت ذرات با افزایش اندازه قطر اریفیس خروجی در انژکتورهای فوق به‌گونه‌ای است که نسبت مؤلفه‌های شعاعی به محوری که تقریباً بیانگر زاویه مخروط پاشش است را نیز کاهش می‌دهد؛ بنابراین انتظار می‌رود که



شکل ۷. نمودار تغییرات غلظت قطرات در راستای شعاع پاشش

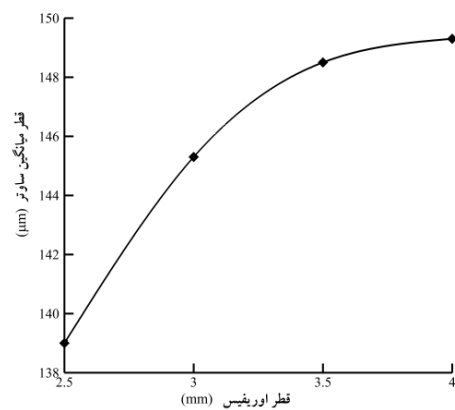
عملکرد مناسب یک انژکتور منوط به ایجاد ذرات زیاد و ریزتر است؛ به همین دلیل برای مقایسه بهتر انژکتورها می‌توان SMD ذرات را مورد استفاده قرارداد. با مقایسه این کمیت برای چهار انژکتور مشاهده می‌شود که با افزایش قطر اریفیس، SMD ذرات موجود در اسپری که در واقع گویای کارایی و بازدهی بهتر یک انژکتور می‌باشد، کاهش می‌یابد. شکل ۹ تغییرات قطر میانگین ساوتر برحسب تغییرات قطر اریفیس نشان می‌دهد.

۵-۱-۲. تأثیر زاویه ماریچ

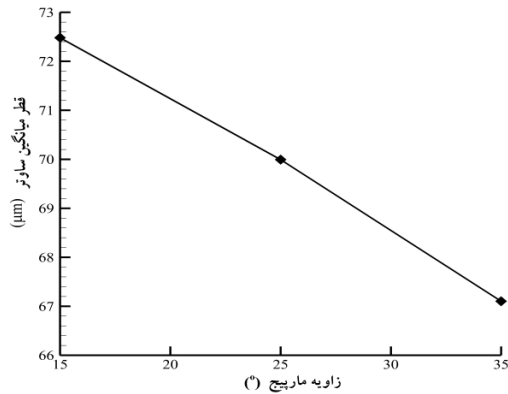
به‌منظور بررسی تأثیر تغییرات زاویه ماریچ، سه انژکتور با زاویه ماریچی متفاوت (انژکتورهای شماره‌های ۱، ۲ و ۳) در شرایط کاملاً برابر و یکسان مورد بررسی قرار می‌گیرند. این زوایا به ترتیب ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجه می‌باشند. بررسی مؤلفه‌های سرعت ذرات نشان می‌دهد که سرعت‌های محوری و شعاعی با افزایش شعاع افزایش می‌یابد. در کل میدان پاشش، مؤلفه سرعت مماسی یکسان بوده و مقدار آن در مقایسه با دو مؤلفه دیگر اندک است. به دلیل اندک بودن این مؤلفه، اثر قابل‌توجهی بر اندازه سرعت مطلق ندارد. شکل ۱۰ نمودار تغییرات قطر میانگین ساوتر برحسب زاویه ماریچ را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه ماریچ، قطر میانگین ساوتر قطرات کاهش ناچیزی پیدا

می‌کند. در این تابع، n پارامتر توزیع است که میزان پراکندگی یا یکنواختی (توزیع) اندازه قطرات را نشان می‌دهد. به دلیل ماهیت تابع توزیع که وابسته به نتایج تجربی است، این پارامتر نیز به کمک نتایج تجربی تعیین می‌شود. این پارامتر در اسپری‌های فشار بالا معمولاً در محدوده ۳ تا ۳/۵ در نظر گرفته می‌شود در

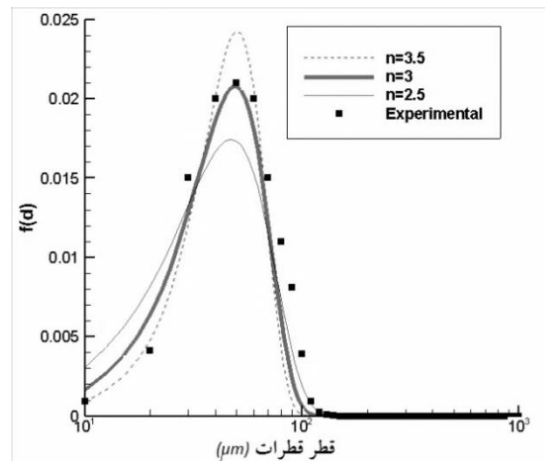
کار تجربی پیشین، توزیع اندازه قطرات بعد از شکست اولیه به کمک روش PDA اندازه‌گیری شده و به همین دلیل می‌توان از این نتایج به عنوان شرایط اولیه شبیه‌سازی اتمیزاسیون اسپری استفاده کرد. با توجه به شکل ۱۱ مقدار مناسب n برای تست‌های ۱ و ۲ به ترتیب ۳ و ۲/۳ خواهد بود.



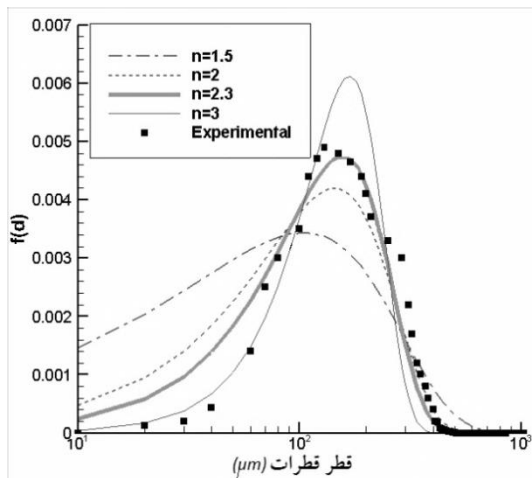
شکل ۹. تغییرات قطر میانگین سائو بر حسب تغییرات قطر اوریفیس



شکل ۱۰. تغییرات قطر میانگین سائو بر حسب تغییرات زاویه ماریجی



(الف)



(ب)

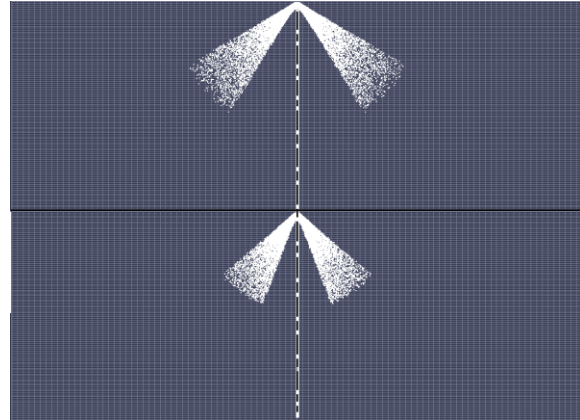
شکل ۱۱. توزیع اندازه قطرات؛ الف) تست اول، ب) تست دوم براساس نتایج تجربی و عددی

بعد از اعمال این پارامترها و تکمیل مدل عددی اسپری حاصل از شبیه‌سازی در زمان ۱/۵ میلی‌ثانیه بعد از پاشش به صورت کیفی در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. در این شکل نمای دوبعدی اسپری و از روبرو در دو تست است. طول عمق نفوذ اسپری یکی از مشخصه‌های اساسی در بررسی عملکرد اسپری است. معمولاً طول نفوذ اسپری از مقطع خروجی آنزکتور تا نقطه‌ای است که در هر لحظه ۹۹ درصد از جرم کل اسپری در آن محدوده جای بگیرد. در اینجا از طول نفوذ ۹۵ درصد استفاده

شده است. همان‌گونه که از شکل ۱۳ نیز مشخص است، طول نفوذ اسپری در تست اول بیشتر از تست دوم می‌باشد که به دلیل فشار تزریق بالاتر در تست اول می‌باشد. از طرف دیگر به علت کارکرد اسپری در فشارهای پایین روند تغییر طول نفوذ در هر دو تست تقریباً خطی است.

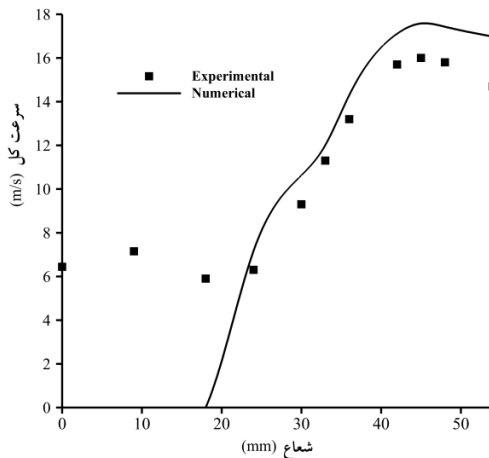
حال با استفاده از دو کمیت مهم در اسپری؛ یعنی سرعت و قطر میانگین قطرات، به بررسی صحت پارامترهای انتخابی در حل عددی پرداخته می‌شود.

تنها به دلیل وجود هسته هوا به داخل این فضای خالی کشیده شده و در حال سقوط هستند. پس اختلاف مقادیر سرعت در محدوده میانی قابل اغماض بوده و دلیل بر خطای کار عددی محسوب نمی‌شود. نتایج نشان می‌دهد که غلظت قطرات در یال‌های کناری پاشش بسیار بالا بوده و خطای پایین در این نقاط (در تست‌های اول و دوم به ترتیب فاصله شعاعی ۳۰ تا ۴۸ میلی‌متر و ۱۸ تا ۳۳ میلی‌متر از مرکز پاشش) نشان‌دهنده دقت بالای شبیه‌سازی خواهد بود.



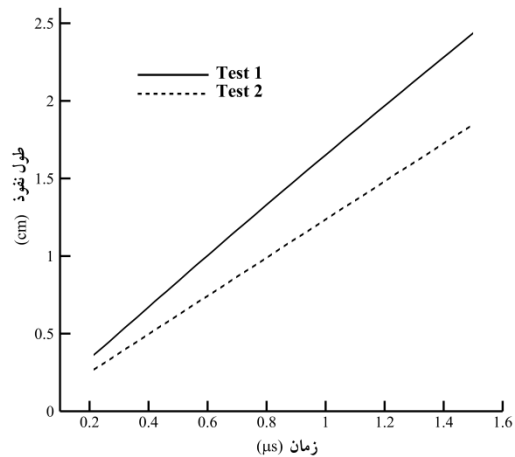
شکل ۱۲. شکل کیفی اسپری پاشش شده به دامنه محاسباتی در تست اول

(بالا) و تست دوم (پایین) به صورت دوبعدی

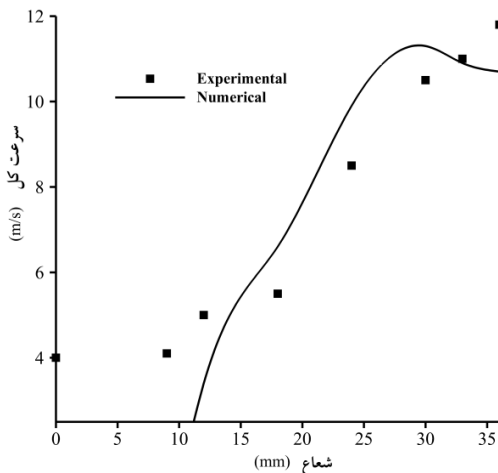


شکل ۱۴. تغییرات سرعت کل در راستای شعاعی براساس نتایج تجربی و

عددی در تست اول



شکل ۱۳. تغییرات طول نفوذ اسپری با زمان



شکل ۱۵. تغییرات سرعت کل در راستای شعاعی براساس نتایج تجربی و

عددی در تست دوم

نتایج تجربی نشان می‌دهد که سرعت قطرات اسپری در یال‌های بیرونی پاشش افت محسوسی دارد. افت سرعت مخصوصاً در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که این کاهش ناشی از پیچش جریان و یا اصطلاحاً ورتکس ایجادشده در نوک اسپری

۵-۲-۱. سرعت

تغییرات سرعت قطرات در راستای خط عمود بر محور پاشش در فاصله ۳ سانتی‌متری از نازل براساس ورودی‌های اعمال شده در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نمایش داده شده است. درصد خطای بین داده‌های تجربی و محاسبات عددی نیز در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، مدل عددی قادر به شبیه‌سازی سرعت قطرات در قسمت میانی و توخالی اسپری نیست، زیرا اساساً در مدل عددی قطرات تنها مجاز به حرکت در فضای بین زاویه پاشش هستند و دلیل اختلاف زیاد بین مقادیر عددی و تجربی در شعاع‌های نزدیک به قسمت توخالی اسپری نیز همین دلیل است. البته وجود این اختلاف در این محدوده از درجه اهمیت پایینی برخوردار است؛ زیرا قطرات سرگردان موجود در این محدوده، که غلظت بسیار کمی نیز در مقایسه با قسمت میانی چتر پاشش دارند، اساساً جزء ماهیت اصلی اسپری به شمار نمی‌روند و

است. در واقع به علت حرکت قطرات در محیط، دائماً تنشی برشی روی هوا اعمال شده و سرانجام سبب چرخش آن می‌شود. در نتیجه به دلیل برهم‌کنش بین ورتکس هوا و اسپری، قطرات کوچکتر به این محدوده ورتکسی کشیده شده و به سمت بالا حرکت می‌کنند [۱۰]. به همین دلیل سرعت اسپری در مرزهای بیرونی کاهش پیدا می‌کند. این چرخش همان‌طور که پیش از این

ذکر شد، در آنژکتور مبنای ۱ به دلیل زاویه پاشش بالاتر آشکارتر خواهد بود. همان‌طور که در شکل نیز مشاهده می‌شود، سرعت قطرات در بدنه مخروط پاشش، مقادیر مشابهی با نتایج تجربی دارد. در واقع بررسی عددی توانسته مناطقی از چتر پاشش که غلظت بسیار بیشتری از قطرات در آن حضور دارند را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند.

جدول ۴. خطای بین مقادیر سرعت حاصل از کار تجربی و عددی

تست ۲		تست ۱	
درصد خطای سرعت محاسبه شده عددی	شعاع (میلی‌متر)	درصد خطای سرعت محاسبه شده عددی	شعاع (میلی‌متر)
-	۰	-	۰
-	۹	-	۹
۳۲	۱۲	-	۱۸
۹/۷۳۴	۱۸	۱۳/۸۰۹	۲۴
۱۰/۲۸۵	۲۴	۱۴/۳۰۱	۳۰
۷/۶۱۹	۳۰	۶/۲۸۳	۳۳
۰/۹۰۹	۳۳	۸/۳۳۳	۳۶
۹/۳۲۲	۳۶	۸/۹۸۰	۴۲
-	-	۹/۸۷۵	۴۵
-	-	۱۰/۳۱۶	۴۸
-	-	۱۵/۵۱۰	۵۴

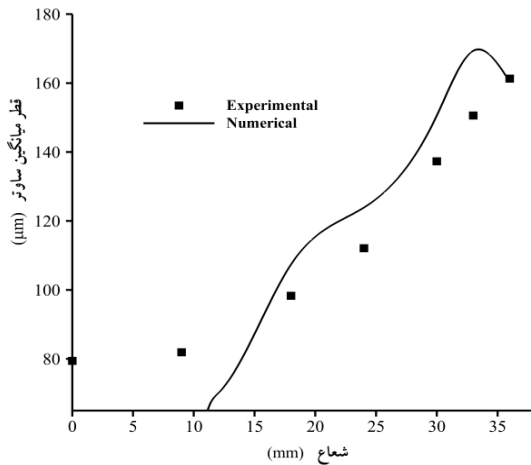
۵-۲-۲. قطر میانگین ساوتر

مقایسه تغییرات قطر میانگین ساوتر حاصل از نتایج عددی و تجربی نیز در راستای خط عمود بر محور پاشش در فاصله ۳ سانتی‌متری از نازل در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ و اختلاف بین نتایج عددی و تجربی نیز در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که در قسمت قبل نیز بیان شد، وجود اختلاف بین مقادیر عددی و تجربی در شعاع‌های نزدیک به محور پاشش، به علت وجود قطرات سرگردان و با تعداد بسیار کم در هسته هوای داخلی اسپری است و دلیل بر خطای کار عددی در این محدوده نیست. همچنین با توجه به اینکه در نواحی نزدیکتر به قسمت بیرونی مرز اسپری قطرات در معرض توده هوای بیشتر بوده و به علت ورتکس ایجاد شده و تجمع بیشتر قطرات ریزتر در شعاع‌های نزدیک به محیط بیرونی اسپری، به همین دلیل قطر میانگین کاهش یافته و دچار افت می‌شود. اگرچه در این نواحی بین نتایج تجربی و عددی اختلاف به وجود می‌آید، اما باز هم به دلیل پایین بودن تعداد قطرات

در این محدوده این اختلاف چشمگیر نبوده و از درجه اهمیت پایینی برخوردار است. در واقع وقتی کار عددی می‌تواند قابل قبول محسوب شود که بتواند رفتار اسپری را نواحی‌ای که تعداد و غلظت قطرات بالاست به خوبی پیش‌بینی کند. از طرفی با بررسی شکل‌های ۱۶ و ۱۷ و جدول ۵ مشاهده می‌شود که در بدنه اصلی چتر پاشش (در تست‌های اول و دوم به ترتیب فاصله شعاعی ۳۰ تا ۴۸ میلی‌متر و ۱۸ تا ۳۳ میلی‌متر از مرکز پاشش) که در آن غلظت قطرات بیشترین مقدار است، نتایج عددی توانسته تطابق قابل قبول و خوبی با نتایج تجربی پیدا کند که نشان از دقت بالای شبیه‌سازی عددی است.

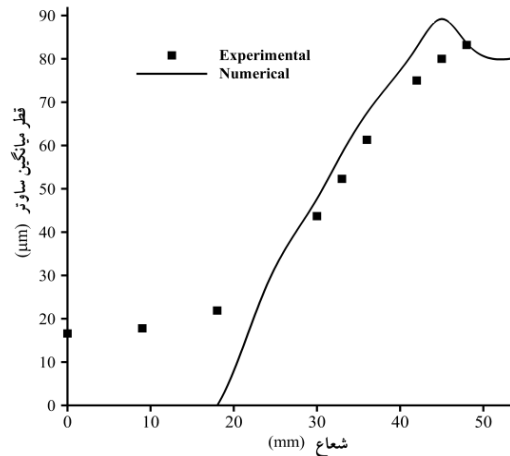
مقایسه شکل‌های ۱۴ و ۱۶ با یکدیگر و همچنین شکل‌های ۱۵ و ۱۷ با هم نشان می‌دهد که قطرات با SMD بالاتر، سرعت بیشتر و در نتیجه اندازه حرکت بزرگتری دارند که پیش از این نیز در نتایج تجربی مشاهده شد. این نتیجه در آنژکتورهای ماریپیچی و فشاری - پیچشی که اسپری مخروطی دارند، رایج می‌باشد. این

پیش‌بینی نتایج مورد نظر را داراست و کمیت‌های ارائه‌شده در هر دو تست مناسب و قابل قبول می‌باشند. پس این مدل قابل اطمینان بوده و می‌توان از آن به‌همراه کمیت‌های تعیین‌شده و مستقل از نتایج تجربی استفاده کرد.



شکل ۱۷. تغییرات قطر متوسط ساوتر در راستای شعاعی براساس نتایج تجربی و عددی در تست دوم

قطرات به دلیل قطر و سرعت بالا، نیروی پسای بیشتری را حس می‌کنند و در ادامه به قطرات ریزتر تبدیل می‌شوند. از مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی در قسمت‌های قبل چنین برمی‌آید که پارامترهای تعیین‌شده در مدل‌های عددی به خوبی توانایی



شکل ۱۶. تغییرات قطر متوسط ساوتر در راستای شعاعی براساس نتایج تجربی و عددی در تست اول

جدول ۵. خطای بین مقادیر قطر میانگین ساوتر کار تجربی و عددی

تست ۲		تست ۱	
درصد خطای SMD محاسبه‌شده عددی	شعاع (میلی‌متر)	درصد خطای SMD محاسبه‌شده عددی	شعاع (میلی‌متر)
-	۰	-	۰
-	۹	-	۹
۱۷/۶۴۷	۱۲	-	۱۸
۹/۲۵۷	۱۸	۲۰/۲۸۵	۲۴
۱۰/۵۲۶	۲۴	۹/۱۵۳	۳۰
۹/۶۸۶	۳۰	۱۱/۲۸۱	۳۳
۱۲/۴۸۳	۳۳	۱۰/۱۱۴	۳۶
۰/۵۵۷	۳۶	۱۰/۲۶۶	۴۲
-	-	۱۱/۵	۴۵
-	-	۰/۴۸۰	۴۸
-	-	۹/۰۷۰	۵۴

استفاده از نتایج تجربی شبیه‌سازی عددی اسپری با استفاده از نرم‌افزار اوپن‌فوم انجام و با تعیین پارامترهای عددی، یک مدل حل سازگار با اسپری مخروطی این انژکتور ارائه شد. نتایج کلی این تحقیق در سه بند زیر خلاصه شده است:

- نتایج تجربی نشان می‌دهد که افزایش زاویه ماریچ و کاهش قطر اریفیس خروجی انژکتور قطر میانگین

۶. جمع‌بندی

در این مقاله یک انژکتور ماریچی مورد بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی قرار گرفت. با به‌کارگیری سیستم لیزری PDA سرعت، قطر و غلظت قطرات در نقاط مشخص از اسپری اندازه‌گیری شد. با تحلیل نتایج تجربی تأثیر پارامترهای هندسی و شرایط جریانی روی اسپری انژکتورهای ماریچی بررسی شد. با

ساوتر قطرات را کاهش داده و سبب افزایش کیفیت اسپری انژکتور می‌شوند که البته تأثیر تغییر قطر اوریفیس به‌مراتب محسوس‌تر از تغییرات زاویه ماریجی است.

۲. نمودارهای توزیع سرعت و SMD در هر دو تست و در نتایج عددی و تجربی بیانگر این است که هرچه از مرکز پاشش به‌سمت کناره‌های مخروط پاششی حرکت کنیم، به سرعت و قطر قطرات افزوده شده تا اینکه در نهایت قطرات موجود در محدوده‌های بیرونی یال پاشش، بیشترین قطر و سرعت را دارند. علت اصلی این توزیع، حرکت هوای اطراف از خارج به داخل چتر پاشش می‌باشد که قطرات ریزتر را با خود به مرکز چتر پاشش حمل می‌کند. در این مدل‌سازی، نتایج عددی

۷. مآخذ

- حاصل از توزیع قطر قطرات (تغییرات SMD) و سرعت قطرات تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارند.
۳. مدل‌های LISA و تابع توزیع رزین - راملر ارائه‌شده در این تحقیق پیش از این به‌طور گسترده در بررسی اسپری‌های فشار بالا مورد استفاده قرار گرفته بود و به‌همراه پارامترهای پیش‌فرضشان قابلیت شبیه‌سازی اسپری‌های فشار پایین را نداشت. پس از تنظیم پارامترهای آن‌ها و ارائه مقادیر ضریب شکست اولیه (C_T) ۵ و ۳ برای تست‌های اول و دوم و همچنین مقادیر پارامتر توزیع (n) ۳ و $2/3$ برای تست‌های اول و دوم، مدل عددی به‌خوبی قادر به شبیه‌سازی اسپری‌های فشار پایین (در محدوده فشاری این مقاله) گردید.
- [1] N. Ashgriz, *Handbook of atomization and sprays: theory and applications*, Springer Science & Business Media, 2011.
- [2] E. Babinsky, P. Sojka, Modeling drop size distributions, *Progress in energy and combustion science*, Vol. 28, pp. 303-329, 2002.
- [3] Z. Han, S. Parrish, P. V. Farrell, R. D. Reitz, Modeling atomization processes of pressure-swirl hollow-cone fuel sprays, *Atomization and Sprays*, Vol. 7, 1997.
- [4] N. Dombrowski, W. Johns, The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets, *Chemical Engineering Science*, Vol. 18, pp. 203-214, 1963.
- [5] X. Li, R. Tankin, On the temporal instability of a two-dimensional viscous liquid sheet, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 226, pp. 425-443, 1991.
- [6] P. Senecal, D. P. Schmidt, I. Nouar, C. J. Rutland, R. D. Reitz, M. Corradini, Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 25, pp. 1073-1097, 1999.
- [7] D. P. Schmidt, I. Nouar, P. Senecal, C. Rutland, J. Martin, R. D. Reitz, et al., Pressure-swirl atomization in the near field, *SAE transactions*, Vol. 108, pp. 471-484, 1999.

- [8] S. E. Parrish, Spray Characterization in a Motored Direct-Injection Spark-Ignited Engine, Ph.D. Thesis, The University of Wisconsin-Madison, 1997.
- [9] Y. -S. Shim, G. -M. Choi, D. -J. Kim, Numerical and experimental study on hollow-cone fuel spray of highpressure swirl injector under high ambient pressure condition, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, pp. 320-329, 2008.
- [10] S. H. Bafekr, M. Shams, R. Ebrahimi, A. Shadaram, Numerical simulation of pressure-swirl spray dispersion by using eulerian-lagrangian Method, *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 32, pp. 47-55, 2010.
- [11] I. Elbadawy, P. H. Gaskell, M. Lawes, H. M. Thompson, Numerical investigation of the effect of ambient turbulence on pressure swirl spray characteristics, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 77, pp. 271-284, 2015.
- [12] J. -W. Ding, G. -X. Li, Y. -S. Yu, H. -M. Li, Numerical Investigation on Primary Atomization Mechanism of Hollow Cone Swirling Sprays, *International Journal of Rotating Machinery*, Vol. 2016.

- [13] M. Naghizadeh, A. Ghahremani, M. H. Saidi, Numerical simulation of spray characteristics of bio-ethanol and its blend with gasoline in a direct injection combustion chamber, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, pp. 112-122, 2015.
- [14] M. Janmohammadi, A. Kebriaei, M. Farshchi, Numerical simulation of flow field inside and outside the pressure swirl injectors, in 14th International Conference of Iranian Aerospace Society, Tehran, 2014.
- [15] M. Soltani, K. Ghorbanian, M. Ashjaee, M. Morad, Spray characteristics of a liquid-liquid coaxial swirl atomizer at different mass flow rates, *Aerospace science and technology*, Vol. 9, pp. 592-604, 2005.
- [16] C. D. Radke, Experimental characterization of a liquid-liquid co-axial swirl rocket injector using non-invasive optical and X-ray techniques, 2012.
- [17] M. Rashad, H. Yong, Z. Zekun, Effect of geometric parameters on spray characteristics of pressure swirl atomizers, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 35, pp. 15790-15799, 2016.
- [18] Z. Zhang, Q. Chen, Comparison of the Eulerian and Lagrangian methods for predicting particle transport in enclosed spaces, *Atmospheric Environment*, Vol. 41, pp. 5236-5248, 2007.
- [19] M. Fogliati, D. Fontana, M. Garbero, M. Vanni, G. Baldi, R. Donde, CFD simulation of paint deposition in an air spray process, *JCT research*, Vol. 3, pp. 117-125, 2006.
- [20] T. -H. Shih, W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, J. Zhu, A new k-epsilon eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows: Model development and validation, 1994.
- [21] F. Peng, S. K. Aggarwal, A review of droplet dynamics and vaporization modeling for engineering calculations, in ASME 1994 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, pp. V003T06A003-V003T06A003.
- [22] F. P. Kärrholm, Numerical modelling of diesel spray injection, turbulence interaction and combustion: Chalmers University of Technology, 2008.
- [23] T. Inamura, H. Tamura, H. Sakamoto, Characteristics of liquid film and spray injected from swirl coaxial injector, *Journal of propulsion and Power*, Vol. 19, pp. 632-639, 2003.
- [24] J. Kennedy, High Weber number SMD correlations for pressure atomizers, *Journal of engineering for gas turbines and power*, Vol. 108, pp. 191-195, 1986.
- [25] W. Hagerty, J. Shea, A study of the stability of plane fluid sheets, *J. Appl. Mech*, Vol. 22, pp. 509-514, 1955.
- [26] N. Dombrowski, P. Hooper, The effect of ambient density on drop formation in sprays, *Chemical Engineering Science*, Vol. 17, pp. 291-305, 1962.
- [27] T. Maric, J. Hopken, K. Mooney, *The OpenFOAM technology primer*, 2014.

بی نوشت

-
- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. OpenFOAM 2. pressure-swirl 3. spiral 4. sauter mean diameter 5. short waves 6. long waves 7. phase Doppler anemometry 8. laser induced exciplex fluorescence 9. fire 10. humidity fire 11. fixture 12. discrete phase method 13. tracking | <ol style="list-style-type: none"> 14. ligament 15. Rosin-Rammler 16. PIMPLE 17. Parcel |
|--|---|