

الحمد لله الذي
خلقنا من
الحمم



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

بررسی تجربی رفتار اسپری تحت تأثیر جت های برخوردی

نگارنده: علی هراتی

اساتید راهنما

دکتر علی سر رشته داری

اساتید مشاور

دکتر محسن نظری

مهر ۱۴۰۰

فرم شماره (۳): صورت جلسه نهایی دفاع

شماره: ۲۰۲۴-۱۹۲
تاریخ: ۱۴۰۱/۸/۱۵
ویرایش:

باسمه تعالی

فرمهای ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد
مربوط به ورودی‌های ۹۴ به بعد



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورت جلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای علی هراتی با شماره دانشجویی ۹۶۱۵۷۷۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان بررسی تجربی رفتار اسپری تحت تأثیر جت های برخوردی که در تاریخ ۱۴۰۰/۰۷/۱۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام می گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☒ (ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹ ☐
ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹ ☐ (د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹ ☐
ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
نوع تحقیق: نظری ☐ عملی ☒

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر علی سر رشته داری	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	-----		
۳- استاد مشاور	دکتر محسن نظری	دانشیار	غایب
۴- استاد داور اول	دکتر محمود نوروزی	دانشیار	
۵- استاد داور دوم	دکتر محمدحسن کیهانی	استاد	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مسلم صبوری	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک: دکتر مهدی گردویی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۱۴۰۱/۸/۱۶



تقدیم:

به پدر و مادر عزیزم

که با تمام وجود برای آموزش و پیشرفت من زحمت کشیدند

زندگی و تمام داشته‌هایم را بدون آن‌ها، تمام

امیدوارم روزی به توانم اندکی از فداکاری‌هایشان را جبران کنم.

شکروقدردانی:

مراتب سپاس را از اساتید ارجمند، آقای دکتر علی سررشته داری و آقای دکتر محسن نظری دارم که بارها همای ایشان، راه را به

اینجانب شناسانیده و با شکلیابی فراوان که در جریان مکارش پایان نامه از خود نشان دادند به من این شانس را دادند که راه های

کوناگون را آزموده تا سرانجام به مسیری که باید سمت و سویافته و کار را به انجام رسانم.

در پایان از آقای بهزاد عزیز، آقای وحید نیکجو، آقای مهدوی و سایر عزیزانی که در انجام این تحقیق مرا یاری کردند تشکر می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب **علی هراتی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکانیک** دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **بررسی تجربی رفتار اسپری تحت تأثیر جت های برخوردی تحت راهنمایی دکتر علی سررشته داری** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایان های، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

تزریق سوخت سیال مایع به جریان جت هوا، موجب فراهم نمودن نفوذ بالای مایع، اختلاط سریع آن با هوا و افزایش عملکرد می‌شود و کاربردهای فراوانی در سیستم‌های پیشران‌های هوا تنفسی (شامل توربین گاز، موتور احتراق داخلی، رم جت)، موتور موشک مایع و تزریق سوخت دارد. در این پژوهش که به‌طور آزمایشگاهی صورت گرفت، الگوهای فروپاشی جت آب با برخورد جت‌های هوا و آب در شدت جریان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. در تحقیق پیش‌رو، اندازه متوسط قطرات در فاصله‌های محوری و شعاعی با پردازش تصویر نرم‌افزار لب‌ویو به‌دست آمدند. پردازش تصویری خاص برای محاسبه سرعت قطره نوشته شده است که با آن می‌توان سرعت قطره در فاصله‌های محوری مختلف در زیر نقطه برخورد را به‌دست آورد. اثر پارامترهایی هم چون زاویه برخورد و شدت جریان‌های مختلف هوا و آب در شکل‌گیری جت آب بررسی شده است. پارامترهای اصلی مؤثر بر ساختار پاشش شناسایی شد و یک مطالعه به‌صورت پارامتری براساس نسبت تکانه هوا به آب، نسبت شار تکانه هوا به آب و نسبت شدت جریان هوا به آب انجام شده است. این مطالعه بعد از شناسایی پارامترهای مذکور که تأثیر عمده‌ای بر ویژگی‌های پاشش دارند، انجام شد. به‌طور کلی، نتایج تجربی نشان می‌دهد که شار تکانه جت هوا، نسبت به آب نقش پررنگی در فروپاشی جت آب ایفا می‌کند. با افزایش شار تکانه جت هوا در آب یا با افزایش نرخ جریان هوا منجر به فروپاشی بهبود یافته می‌شود. در این پژوهش، صفحه جت آب با مدل فروپاشی کیسه‌ای در سرعت‌های پایین و فروپاشی مدل فیبر در سرعت‌های بالاتر دچار فروپاشی شدند. هم‌چنین مشاهده شد که با افزایش سرعت هوا در نقطه برخورد، ناپایداری‌ها روی جت آب تشدید می‌شوند. پارامترهایی مانند نسبت تکانه هوا به آب، نسبت شار تکانه هوا به آب، نسبت شدت جریان هوا به آب و زاویه برخورد برای توصیف مقدار قطر متوسط ساوتر پاشش بررسی شدند. بازدهی انژکتورهای جت برخوردی، به کمک هوا برای آب در چندین نسبت شدت جریان هوا به آب بررسی شد. برای توصیف ساختار پاشش، دو زاویه پاشش متفاوت در این مطالعه

تعریف شده‌اند که شامل زاویه انحراف (β) و زاویه واگرایی (α) هستند. هم‌چنین توزیع شارحجمی آب در پالس‌های مختلف زمانی بررسی شد.

کلمات کلیدی: جت برخوردی، طول فروپاشی مایع، قطر متوسط ساوتر، بازده اتمیزاسیون پاشش

فهرست مطالب

فصل ۱ : مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه، هدف تحقیق و اهمیت آن	۲
۱-۲- اتمیزاسیون و پاشش سوخت	۹
۱-۲-۱- اعداد بدون بعد	۱۰
۱-۲-۲- جریان مایع در جت عرضی	۱۱
۱-۳- انواع اتمیزاسیون جت	۱۳
۱-۳-۱- اتمیزاسیون اولیه	۱۴
۱-۳-۲- اتمیزاسیون ثانویه	۱۴
۱-۴- پیشنهاد تحقیق	۱۶
۱-۵- بیان کلیات مسئله	۲۸
۱-۶- صورت مسئله	۲۸
۱-۸- نوآوری مسئله	۳۰
فصل ۲: تئوری و فیزیک مسئله	۳۱
۲-۱- ویژگی‌های اتمیزاسیون با دو جت مایع به کمک هوا	۳۲
۲-۲- اتمیزاسیون با یک جت مایع به کمک هوا	۳۹
فصل ۳: ستاپ آزمایش	۴۳
۱-۳- مقدمه	۴۴
۳-۲- طراحی و ساخت ستاپ آزمایش	۴۴
۳-۴- تجهیزات	۴۸

۴۸	۱-۳-۴-دوربین پرسرعت
۵۰	۲-۳-۴-منبع نوری
۵۰	۳-۳-۴-انژکتور
۵۲	۴-۳-۴-پایه ستاپ انژکتور
۵۳	۵-۳-۴-روتامتر
۵۴	۶-۳-۴-کمپرسور هوا
۵۵	۷-۳-۴-مخزن پرفشار سیال
۵۶	۸-۳-۴-سرعت سنج هوا
۵۷	۳-۵-سیستم ثبت تصویر
۵۸	۳-۶-اعتبارسنجی ستاپ آزمایش
۵۹	فصل چهارم: نتایج حاصل
۶۰	۴-۱-مقدمه
۶۱	۴-۲-اعداد بی بعد مورد مطالعه
۶۴	۴-۳-ساختار و رفتار پاشش
۹۰	۴-۴-طول فروپاشی جت
۱۰۴	۵-۴-زاویه پاشش
۱۰۵	۴-۵-۱-نحوه اندازه گیری زاویه و گرای و انحراف پاشش
۱۱۶	۴-۶-اندازه قطر و توزیع قطرات
۱۱۶	۴-۶-۱-نحوه ثبت تصاویر قطرات ریز
۱۱۷	۴-۶-۲-نحوه پردازش تصویر قطرات ریز
۱۲۰	۳-۶-۳-بررسی میزان صحت سنجی اندازه گیری سائز قطرات توسط نرم افزار
۱۴۱	۴-۷-متوسط سرعت قطرات
۱۴۵	۴-۸-شار حجمی مایع
۱۴۷	۴-۹-بازده اتمیزاسیون و کاربرد آن در پاشش های به کمک هوا

۴-۹-۱ بازده اتمیزاسیون و کاربرد آن در پاشش‌های به کمک هوا همراه با عملکرد----- ۱۴۹

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات----- ۱۵۱

۵-۱- مقایسه نتایج----- ۱۵۲

۵-۲- نتیجه‌گیری ----- ۱۵۴

۵-۳- پیشنهاد ادامه انجام کار----- ۱۵۶

فهرست جداول

- جدول ۱-۱- موارد استفاده قطرات در کارهای صنعتی [۵]----- ۴
- شکل ۱-۳- سیستم سیال‌رسانی به جت‌ها و نحوه‌ی جایگیری منبع نوری و دوربین سرعت بالا----- ۴۷
- شکل ۲-۳- شماتیک سیستم سیال‌رسانی به جت‌ها و نحوه‌ی جایگیری منبع نوری و دوربین سرعت بالا----- ۴۷
- جدول ۱-۳- مشخصات روتامتر هوا و آب----- ۵۴
- جدول ۲-۳- مقایسه مشخصات آزمایش انجام شده با ستاپ ساخته شده و توسط ژیا [۵۱]----- ۵۸
- جدول ۱-۴- خواص سیال‌های استفاده شده در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد----- ۶۱
- جدول ۲-۴- سرعت نقطه برخورد، عدد وبر، عدد رینولدز، GLR، MR، MFR----- ۶۳
- جدول ۳-۴- حداکثر عدد زوایه واگرایی پاشش با شدت جریان ۳۰ گرم بر دقیقه و سرعت ۶/۶۵ متر بر ثانیه
----- ۱۱۰
- جدول ۴-۴- حداقل عدد زوایه واگرایی پاشش با شدت جریان ۵ گرم بر دقیقه و سرعت ۱/۳۳ متر بر ثانیه
----- ۱۱۰
- جدول ۵-۴- حداکثر عدد زوایه انحراف پاشش با شدت جریان ۳۰ گرم بر دقیقه و سرعت ۶/۶۵ متر بر ثانیه
----- ۱۱۴
- جدول ۶-۴- حداقل عدد زوایه انحراف پاشش با شدت جریان ۵ گرم بر دقیقه و سرعت ۱/۳۳ متر بر ثانیه
----- ۱۱۴
- جدول ۷-۴- به‌دست آوردن خطای اندازه‌گیری نتایج----- ۱۲۲
- جدول ۸-۴- تغییرات زاویه ای مقدار بدون بُعدشده و مقدار MR----- ۱۳۲
- جدول ۹-۴- مقدار شار حجمی اندازه‌گیری پاشش برحسب GLR در شدت جریان ۵ گرم بر دقیقه----- ۱۴۵
- جدول ۱۰-۴- مقدار شار حجمی اندازه‌گیری پاشش برحسب GLR در شدت جریان ۱۵ گرم بر دقیقه----- ۱۴۵

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- فرآیند کامل اتمیزاسیون [۲] ----- ۲
- شکل ۲-۱- نحوه فروپاشی سیال [۳] ----- ۳
- شکل ۳-۱- پاشش در فشار ۰/۵ بار در گذر زمان [۶] ----- ۵
- شکل ۴-۱- پاشش در فشار ۴ بار در گذر زمان [۶] ----- ۶
- شکل ۵-۱- صفحه انژکتور موتور سوخت مایع [۹] ----- ۸
- شکل ۶-۱- حضور انژکتورهای برخوردی در موتور F-1 در مرحله اول پرتاب Saturn V [۱۰] ----- ۸
- شکل ۷-۱- تزریق جت مایع به جریان عرضی هوا [۱۵] ----- ۱۲
- شکل ۸-۱- نحوه فروپاشی قطرات [۱۸] ----- ۱۵
- شکل ۹-۱- الگوهای پاشش دسته‌بندی شده توسط لی و همکاران [۲۰] ----- ۱۸
- شکل ۱۰-۱- نمای جلوی صفحه جت آب (با سرعت جت ۷۷/۶ متر بر ثانیه و زاویه برخورد ۹۰ درجه [۲۴] ۲۰
- شکل ۱۱-۱- مقایسه نتایج فعلی قطر متوسط ساوتر با نتایج منتشر شده [۳۶] ----- ۲۴
- شکل ۱۲-۱- رژیم‌های فروپاشی در فضای پارامتر Re-We [۴۰] ----- ۲۴
- شکل ۱۳-۱- معنای فیزیکی قطر متوسط ساوتر [۴۱] ----- ۲۵
- شکل ۱-۲- سیستم پیشنهادی برای پاشش سه جت برخوردی [۴۴] ----- ۳۳
- شکل ۲-۲- اثر تزریق میکروجت بر روی اتمیزاسیون در $We_L = 500$ [۴۵] ----- ۳۵
- شکل ۳-۲- توزیع سرعت قطره محوری متوسط در امتداد محور پاشش در ۲۷ گرم بر دقیقه [۴۷] ----- ۳۷
- ۳۸
- شکل ۴-۲- الگوی پاشش در تعداد متفاوت جت مایع [۴۸] ----- ۳۸
- شکل ۵-۲- نمایش اتمیزاسیون با استفاده از جت‌های برخوردی [۵۰] ----- ۴۰
- شکل ۶-۲- طول فروپاشی مایع [۵۱] ----- ۴۱
- شکل ۳-۳- دوربین پرسرعت مدل PCO-Dimax S1 ----- ۴۹
- شکل ۴-۳- لنز مورد استفاده ۱۰۵ میلی‌متر ساخت نیکون ----- ۴۹
- شکل ۵-۳- پروژکتور ۲۰۰۰ وات شرکت UNIMAT ----- ۵۰
- شکل ۶-۳- انژکتور ساخته شده برای دو جت هوا و آب ----- ۵۲
- شکل ۷-۳- پایه ستاپ انژکتور ----- ۵۲
- (الف) (ب) ----- ۵۴
- شکل ۸-۳- روتامتر ساخته شده برای اندازه‌گیری نرخ شدت جریان (الف): آب- (ب): هوا ----- ۵۴
- شکل ۹-۳- کمپرسور هوای ۱/۵ اسب بخار شرکت HYUNDAI ----- ۵۵
- شکل ۱۰-۳- مخزن پرفشار آب ----- ۵۶
- شکل ۱۱-۳- دستگاه اندازه‌گیری سرعت هوا Smart Sensor AR886 ----- ۵۷
- شکل ۱۲-۳- نحوه اندازه‌گیری سرعت هوا در نقطه برخورد دو جت ----- ۵۷

- شکل ۴-۱- شماتیک پیکربندی انژکتور هوا و آب----- ۶۵
- شکل ۴-۲- جزییات سه بعدی پیکربندی انژکتور هوا و آب برای ستاپ طراحی شده ----- ۶۵
- شکل ۴-۳- ساختار پاشش در شدت جریان‌های مختلف در زاویه ۴۵ درجه نمای روبه‌رو-کنار ----- ۷۶
- شکل ۴-۴- ساختار میدان جریان جت آب در شدت جریان‌های مختلف در زاویه ۴۵ درجه نمای رو به رو-نمای کناری ----- ۸۹
- شکل ۴-۵- نمای روبه‌رو پاشش به همراه اندازه طول فروپاشی ----- ۹۱
- شکل ۴-۶- اندازه طول فروپاشی جت آب در نمای کناری ----- ۹۲
- شکل ۴-۷- تکامل زمانی نفوذ جت هوا به یک جت آب و تشکیل فروپاشی ----- ۹۲
- شکل ۴-۸- فرآیند پردازش تصویر فرآیند فروپاشی جت آب ----- ۹۳
- شکل ۴-۹- رژیم‌های فروپاشی مایع در جریان گاز در فضای پارامتر Re-We [۴۰] ----- ۹۵
- شکل ۴-۱۰- مقایسه اندازه طول فروپاشی بدون بعد بر حسب پارامتر MFR در سه زاویه برخورد مختلف ----- ۹۷
- شکل ۴-۱۱- مقایسه اندازه طول فروپاشی بدون بعد بر حسب پارامتر MR در سه زاویه برخورد مختلف ----- ۹۹
- شکل ۴-۱۲- مقایسه اندازه طول فروپاشی بدون بعد بر حسب پارامتر ER در سه زاویه برخورد مختلف ----- ۱۰۰
- شکل ۴-۱۳- طول فروپاشی بدون بعد بر حسب عدد رینولدز در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه ----- ۱۰۱
- شکل ۴-۱۳- طول فروپاشی بدون بعد بر حسب عدد وبر در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه ----- ۱۰۳
- شکل ۴-۱۵- طول فروپاشی بدون بعد بر حسب پارامتر GLR در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه ----- ۱۰۴
- شکل ۴-۱۶- زاویه انحراف پاشش β ----- ۱۰۶
- شکل ۴-۱۷- زاویه واگرایی پاشش α ----- ۱۰۶
- شکل ۴-۱۸- شماتیک زوایای پاشش در دو نمای کنار و روبه‌رو ----- ۱۰۶
- شکل ۴-۱۹- زوایای واگرایی پاشش بر حسب MR ----- ۱۰۸
- شکل ۴-۲۰- زوایای انحراف پاشش بر حسب MR ----- ۱۰۸
- شکل ۴-۲۱- زوایای واگرایی پاشش بر حسب سرعت‌های آب در زوایای مختلف ----- ۱۱۱
- شکل ۴-۲۲- اثر GLR بر زاویه واگرایی پاشش از نمای روبه‌رو ----- ۱۱۲
- شکل ۴-۲۳- زوایای انحراف پاشش بر حسب سرعت‌های آب در زوایای مختلف ----- ۱۱۵
- شکل ۴-۲۴- اثر GLR بر زاویه واگرایی پاشش از نمای کناری ----- ۱۱۶
- شکل ۴-۲۵- نمونه‌ای از تصاویر از قطرات پاشش در شدت جریان ۲۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه و ۱۵ گرم بر دقیقه در عکس‌برداری ۴۰۰۰ فریم بر ثانیه ----- ۱۱۹
- شکل ۴-۲۶- قطرات بی‌کیفیت و فوکوس نشده ----- ۱۱۹
- شکل ۴-۲۷- تصویر پردازش شده قطرات ----- ۱۱۹
- شکل ۴-۲۸- نحوه قرارگیری قطرات ----- ۱۲۱
- شکل ۴-۲۹- طراحی انژکتور برای اعتبارسنجی ----- ۱۲۱
- شکل ۴-۳۰- اجرای نرم افزار و بهدست آوردن نتایج برای اعتبارسنجی نتایج ----- ۱۲۲
- شکل ۴-۳۱- شدت جریان حجمی ۲۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه و زاویه ۴۵ درجه ----- ۱۲۳

- شکل ۴-۳۳- توزیع قطرات شدت جریان حجمی ۲۰۰ میلی لیتر بر دقیقه، شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه
۱۲۵-----
- شکل ۴-۳۴- تعداد کل قطرات در ناحیه پاشش شدت جریان حجمی ۲۰۰ میلی لیتر بر دقیقه، شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه و زاویه ۴۵ درجه
۱۲۶-----
- شکل ۴-۳۵- تغییرات اندازه قطرات در راستای شعاعی محور X
۱۲۷-----
- شکل ۴-۳۶- توزیع متوسط SMD در امتداد محوری پاشش در شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه در زوایای برخورد مختلف
۱۲۹-----
- شکل ۴-۳۷- متوسط SMD در عدد رینولدزهای آب و مکان های محوری مختلف
۱۳۰-----
- شکل ۴-۳۸- تغییر SMD برای زوایای برخورد مختلف بر حسب MR
۱۳۲-----
- شکل ۴-۳۹- اثر سینوسی زاویه برخورد بر روی SMD
۱۳۳-----
- شکل ۴-۴۰- تغییرات محوری SMD پاشش
۱۳۴-----
- شکل ۴-۴۱- تأثیر سرعت های مختلف گاز در شدت جریان ثابت آب بر روی اندازه قطرات
۱۳۵-----
- شکل ۴-۴۲- تغییر متوسط SMD بر حسب GLR
۱۳۶-----
- شکل ۴-۴۳- تغییر متوسط SMD بر حسب GLR در شدت جریان ۱۵۰ میلی لیتر بر دقیقه
۱۳۷-----
- شکل ۴-۴۴- تغییر متوسط SMD بر حسب MFR در زوایای برخورد مختلف
۱۳۸-----
- شکل ۴-۴۵- تغییرات مقدار SMD در سرعت های مختلف آب در راستای محور شعاعی
۱۳۹-----
- شکل ۴-۴۶- توزیع متوسط SMD در راستای محور عمودی Z در شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه
۱۴۰-----
- شکل ۴-۴۷- توزیع مقدار SMD بدون بعد بر حسب عدد وبر
۱۴۱-----
- شکل ۴-۴۸- نحوه به دست آوردن سرعت قطرات
۱۴۲-----
- شکل ۴-۴۹- قطرات طراحی شده برای اعتبارسنجی
۱۴۲-----
- شکل ۴-۵۰- اجرای نرم افزار برای به دست آوردن نتایج سرعت قطره
۱۴۳-----
- شکل ۴-۵۱- متوسط سرعت قطرات در شدت جریان های مختلف آب در شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه
۱۴۴-----
- شکل ۴-۵۲- متوسط سرعت قطرات در GLR های مختلف
۱۴۴-----
- شکل ۴-۵۳- تغییرات شار حجمی بر اساس شدت جریان جرمی ۵ و ۱۵ گرم بر دقیقه بر حسب GLR
۱۴۶-----
- شکل ۴-۵۴- بازده اتمیزاسیون با انژکتور هوا
۱۴۸-----
- شکل ۴-۵۵- حداقل قطر متوسط ساوتر (d32) بر اساس بازده اتمیزاسیون
۱۴۸-----
- شکل ۴-۵۶- بازده اتمیزاسیون جت های برخوردی به کمک هوا به عنوان تابعی از GLR
۱۴۹-----
- شکل ۵-۱- مقایسه طول فروپاشی بدون به دست آمده در مقایسه با کار آقای ژیا [۵۱]
۱۵۳-----
- شکل ۵-۲- مقایسه قطر متوسط ساوتر به دست آمده در مقایسه با کار آقای ژیا در شدت جریان ۱۰۰ میلی لیتر بر دقیقه و شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه در $X=0$ میلی متر [۵۱]
۱۵۴-----

فهرست علائم

نسبت انرژی هوا به آب	ER	سطح مقطع سطح کروی	$A_i=$
نسبت شدت جریان هوا به آب	GLR	سطح مقطع سطح کروی یکسان	A_j
طول هندسه	L (m)	نسبت شدت جریان هوا به آب	ALR
نسبت توسعه یافتگی جریان از خروجی انژکتور	$\frac{L}{D}$	قطر انژکتور	D (mm)
شدت جریان هوا	$m_g (\frac{g}{min})$	قطر متوسط ساوتر	$D_{32} (\mu m)$
نسبت تکانه هوا به آب	MR	قطر ذرات معلق	d_i
نسبت شار تکانه هوا به آب	MFR	اشیای یکسان با قطر یکسان	d_j
تعداد ذرات	n_i	حداقل قطر منحنی فرکانس	d_{min}
ذرات با سطح مقطع یکسان	n_j	حداکثر قطر منحنی فرکانس	d_{max}
عدد آنسورگ	Oh	انرژی سطح یک جسم کروی	E_i
هیستوگرام	q(d)	انرژی کل سطح	E_j
حجم های متفاوت	V_i	شدت جریان آب	$\dot{Q}_l (\frac{ml}{min})$
حجم کل برای اندازه یکسان	$U_J (m/s)$	شعاع جت	R (mm)
سرعت محوری جت	V (m/s)	عدد رینولدز	Re
حجم های متفاوت	V_i	عدد رینولدز هوا	Re_G

حجم کل برای اندازه یکسان	V_j	عدد رینولدز آب	Re_L
سرعت هوا	$V_G \text{ (m/s)}$	سرعت هوا	$U_A \text{ (m/s)}$
سرعت آب	$V_L \text{ (m/s)}$	سرعت هوا	$U_G \text{ (m/s)}$
سرعت محوری جت	$V_{ril} \text{ (m/s)}$	عدد رینولدز	Re
سرعت محوری جت	$V \text{ (m/s)}$	عدد رینولدز هوا	Re_G
فاصله محوری در راستای محور X در پایین نقطه برخورد دو جت	$X \text{ (mm)}$	عدد رینولدز آب	Re_L
فاصله عمودی در راستای محور Z در پایین نقطه برخورد دو جت	$Z \text{ (mm)}$	قطر متوسط ساوتر	Sauter mean diameter (SMD)
		سرعت هوا	$U_A \text{ (m/s)}$
		سرعت گاز	$U_G \text{ (m/s)}$
		سرعت هوا در نقطه برخورد	$U_{imp} \text{ (m/s)}$
		سرعت جریان آب	$U_J \text{ (m/s)}$

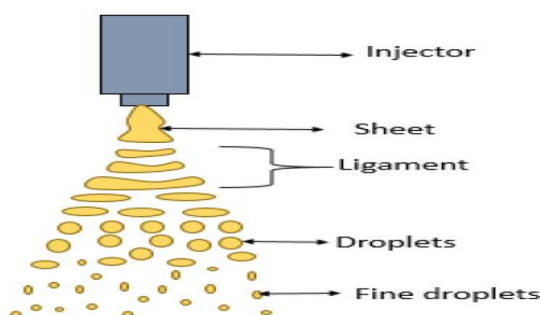
لزجت دینامیکی آب	$\mu_l \left(\frac{N \cdot s}{m^2} \right)$	چگالی	$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$
بازده اتمیزاسیون	η_a	چگالی هوا	$\rho_g \left(\frac{kg}{m^3} \right)$
زاویه برخورد بین دو جت	θ	چگالی آب	$\rho_l \left(\frac{kg}{m^3} \right)$
درصد نسبت شدت جریان هوا به آب	$\phi \text{ (\%)}$	کشش سطحی	$\sigma \left(\frac{N}{m} \right)$
زاویه واگرایی پاشش	β	کشش سطحی آب	$\sigma_l \left(\frac{N}{m} \right)$
زاویه انحراف پاشش	α	لزجت دینامیکی	$\mu \left(\frac{N \cdot s}{m^2} \right)$
لزجت سینماتیکی	$\vartheta \left(\frac{m^2}{s} \right)$	لزجت دینامیکی هوا	$\mu_g \left(\frac{N \cdot s}{m^2} \right)$

فصل ۱: مقدمه

۱-۱- مقدمه، هدف تحقیق و اهمیت آن

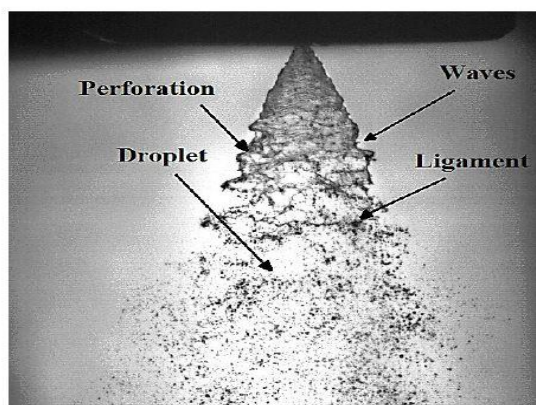
پدیده اتمیزاسیون فرآیندی اطلاق می‌شود که در آن حجم مایع به‌صورت ذرات ریز پاشش می‌شود. یکی از راه‌های تبدیل حجم سیال به قطرات کوچک‌تر با انژکتور است. انژکتور، مایع را به قطرات بسیار ریزی تبدیل می‌کند. این پروسه شامل فروپاشی جت مایع است که از انژکتور خارج می‌شود. از عوامل مهمی که بر فروپاشی جت مایع مؤثر هست خصوصیات فیزیکی جریان مایع، شکل و قطر انژکتور و شرایط محیط است. فرآیند اتمیزه شدن انژکتور، عمدتاً توسط چهار نیرو کنترل می‌شود؛ یعنی نیروی آیرودینامیکی، نیروی چسبنده، کشش سطحی و نیروی ماندگاری مایع است. تعامل بین این نیروها موجب شکستن و فروپاشی مایع می‌شود؛ به‌طور کلی اعتقاد بر این است که فرایند اتمیزاسیون انژکتور به فرایند اتمیزه کردن جت و فرایند اتمیزه کردن فیلم مایع تقسیم می‌شود.

اتمیزه کردن پاشش فرآیند به‌دست آوردن قطرات ریز سوخت در راستای طول تزریق است. میزان تبخیر سوخت با کاهش اندازه قطرات، افزایش می‌یابد؛ هنگامی که تعداد قطرات سوخت افزایش می‌یابد، سطح مقطع قطرات کاهش می‌یابد که منجر به بهبود کیفیت تبخیر می‌شود؛ به‌طور کلی، پاشش سوخت به‌صورت یک صفحه ظاهر شده و به لیگامنت‌ها تقسیم می‌شود [۱]. لیگامنت‌های جدا شده، همان‌طور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است به قطرات کوچک و ریز تبدیل می‌شود. اتمیزاسیون را می‌توان با تعداد قطرات تشکیل شده، مشخص کرد. اتمیزه شدن مؤثر، تبخیر سوخت را افزایش خواهد داد که به‌نوبه خود باعث کاهش دیواره و انتشار هیدروکربن می‌شود [۲].



شکل ۱-۱- فرآیند کامل اتمیزاسیون [۲]

پایه و اساس فروپاشی سیال‌های مختلف، تعادل بین نیروهای برهم زننده و انسجام دهنده است؛ از جمله نیروهای برهم زننده می‌توان به انرژی جنبشی، نوسانات فشار، نیروی برشی سیال، اصطکاک، انبساط هوا و نیروی گرانش اشاره کرد. صفحه خروجی جت سیال به علت نیروهای آیرودینامیکی محیط بی‌ثبات شده و باعث رشد امواج و ایجاد حفره بر سطح صفحه سیال می‌شود. این عوامل ذکر شده باعث فروپاشی مایع شده و به لیگامنت‌های سیال و در آخر به قطرات ریز تبدیل می‌شوند. فرآیند فروپاشی صفحه جت سیال در شکل ۱-۲ نشان داده شده است [۳].



شکل ۱-۲- نحوه فروپاشی سیال [۳]

اتمیزاسیون مایعات در محیط گازی کاربردهای زیادی در تزریق سوخت، صنایع کشاورزی، فرآیند تولید محصولات غذایی، صنایع شیمیایی و متالورژی دارد. اتمیزاسیون به فرآیند دستیابی به قطرات ریز سوخت در حین تزریق مایع (سوخت) اطلاق می‌شود. پاشش سوخت به صورت یک صفحه مایع پدیدار می‌شود و سپس به پیوندهای مایع تجزیه می‌شود که باعث تشکیل دهنده ذرات ریز مایع (قطرات) می‌شود. اتمیزاسیون مناسب باعث بهبود تبخیر سوخت و در نتیجه کاهش تولید هیدروکربن می‌شود [۴].

اتمیزاسیون مایع در بسیاری از کاربردها هم‌چون موتورهای احتراق داخلی^۱، توربین‌های گازی، پاشش نقاشی و واکنش‌های شیمیایی فرآیند مهمی است. روش‌های گوناگونی برای اتمیزاسیون مایع در مقالات

^۱IC engines

گزارش شده است. یکی از روش‌هایی که در آن از جریان گاز برای کمک به اتمیزه شدن مایع استفاده می‌شود، به صورت اتمیزاسیون دو سیاله^۵ است. در بیش تر مطالعات مربوط به اتمیزاسیون مایع یا یک صفحه^۶ جت مایع توسط جت هوا منفجر می‌شود و یا به گاز اجازه داده می‌شود تا با مایع داخل انژکتور ترکیب شود تا یک پاشش را تشکیل دهد. اتمیزاسیون به کمک هوا از مقدار نسبتاً کمتری از هوا در فشار بالا استفاده می‌کند؛ در حالی که مقدار نسبتاً زیادی از هوا در فشار پایین در اتمیزه شدن به وسیله هوا استفاده می‌شود. این روش‌ها به طور گسترده در مقالات برای اتمیزاسیون انواع مختلف مایعات مورد، استفاده قرار گرفته‌اند [۵].

قطرات به طور گسترده‌ای در کارهای علمی و مهندسی کاربرد دارند [۵]. تعداد بسیاری از فعالیت‌های صنعتی مانند پاشش احتراق^۲، پاشش خشک‌کن^۳، پاشش خنک‌کن^۴، پاشش حرارتی^۵ و... با قطره سروکار دارند. کاربرد استفاده از قطرات در جدول (۱-۱) شرح داده شده است :

جدول ۱-۱- موارد استفاده قطرات در کارهای صنعتی [۵]

کاربرد	زمینه
✓ فرآوری شیرخشک ✓ فرآوری مواد شیمیایی ✓ فرآوری غذا	پاشش خنک کن
✓ توربین‌های گازی ✓ موتورهای موشک ✓ کوره‌های صنعتی ✓ بویلر ✓ موتورهای دیزل ✓ موتورهای احتراق جرقه ای	پاشش احتراق

^۱Twin fluid atomization

^۲Spray combustion

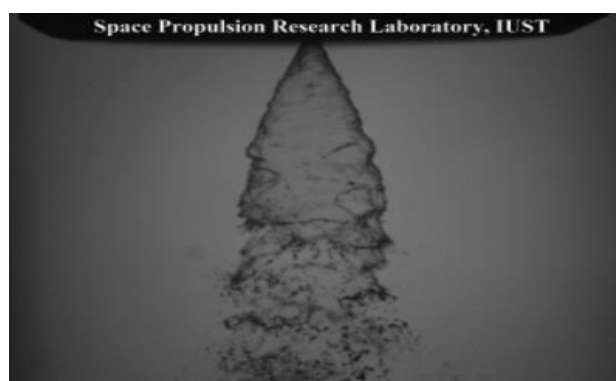
^۳Spray drying

^۴Spray cooling

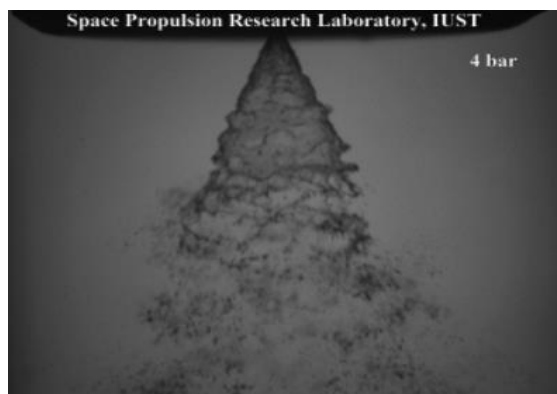
^۵Thermal spray

✓ خنک کنندگی تیغه دوربین ✓ خنک کنندگی هسته‌های اتمی ✓ خنک کنندگی زغال سنگ ✓ خنک کنندگی شمش فلزات در رخته گیری	پاشش خنک کنندگی
✓ روغن کاری ✓ کنترل آلودگی و غبار ✓ مرطوب‌سازی در تهیه مطبوع ✓ خیس خوری ✓ آتش نشانی	پاشش مه
✓ آبیاری با پاشش ✓ افزودن مواد شیمیایی کشاورزی	پاشش کشاورزی
✓ نهایی‌سازی سطح ✓ پوشش سطح	پاشش رنگ
✓ شست و شو شن ✓ تمیز کنندگی سطوح ✓ شست و شوی خودرو ✓ مالش باز	پاشش تمیز کننده

اتمیزه کردن سوخت پدیده‌ای مهم در فرآیند احتراق است که بهبود آن موجب کوتاه‌تر شدن طول فروپاشی پاشش و کوچک‌تر شدن قطر متوسط قطرات می‌شود. مطالعه‌ی عددی و تجربی این فرآیند بسیار پیچیده و البته حائز اهمیت است. در شکل‌های زیر نمونه‌هایی از مطالعات تجربی بر پاشش سیال مشاهده می‌شود [۶].



شکل ۱-۳- پاشش در فشار ۰/۵ بار در گذر زمان [۶]



شکل ۱-۴- پاشش در فشار ۴ بار در گذر زمان [۶]

یکی از علت‌هایی که بر کارایی موتور موشک‌های سوخت مایع کاربرد دارد، فرآیند اتمیزاسیون است. زمان تبخیر یک قطر قطره با مساحت سطح مربع رابطه مستقیم دارد. به همین علت قطرات ریزتر، بسیار سریع‌تر تبخیر می‌شوند. بنابراین، لازم است برای احتراق کامل، طول محفظه احتراق کاهش یابد. عامل بی‌ثباتی احتراق در موتورهای موشک سوخت مایع، قطر قطرات تشکیل‌شده پاشش است؛ پس در نتیجه قطرات با قطر ریز باعث افزایش ناپایداری‌ها با فرکانس بالا در محفظه احتراق می‌شوند [۷].

اتمیزاسیون جت مایع در موارد گوناگونی، مثل توربین‌های گازی، موتورهای موشک سوخت مایع و کوره‌های صنعتی استفاده می‌شود. در این گونه موارد، دستیابی به نرخ آزادسازی گرمای حجمی بالا، اشتعال آسان‌تر، بازه اشتعال گسترده‌تر و کاهش آلاینده‌های کمتر بر اثر کاهش اندازه قطر قطرات تأیید شده است. برای بهبود کیفیت محفظه احتراق، سیستم‌های اتمیزاسیون متعددی برای افزایش نرخ مخلوط‌شدن و مساحت سطح مقطع موتور سوخت مایع گسترش یافته‌اند. اتمیزاسیون‌های دو-سیاله^۱ به دلیل سرعت نسبتاً پایین مایع بیش‌ترین مورد توجه قرار گرفته‌اند [۸].

انژکتورهای موجود در صنعت به چند دسته خاص یعنی از جمله انژکتورهای برخوردی، فشاری و پیچشی و... دسته‌بندی می‌شوند. مدل‌های مختلف این دو نوع انژکتور، کاربردهای فراوانی در اتمیزاسیون با کیفیت و تأمین اختلاط یکنواخت در محفظه احتراق را دارند. نحوه فرآیند اتمیزاسیون و اختلاط سوخت

^۱twin-fluid atomizers

در انژکتورهای برخوردی، بدین صورت است که سیال‌های مورد استفاده به صورت جت و با برخورد به همدیگر است. برای بهبود کیفیت اتمیزاسیون، جت‌ها در هنگام برخورد با یکدیگر تحت زاویه خاصی باهم مخلوط می‌شوند. برای انتقال انواع مختلف سوخت به محفظه احتراق در شدت جریان و فشار بالا، انژکتورهای برخوردی به‌طور ویژه‌ای مناسب این کار هستند. انژکتورهای برخوردی به دلیل سادگی در ساخت و تولید، عملکرد مناسب و ویژگی‌های عالی اتمیزاسیون در موتورهای سوخت مایع و موتورهای موشک استفاده می‌شوند برای کنترل اندازه و بهبود یکنواخت پاشش می‌توان از انژکتورهای برخوردی استفاده کرد و کاربردهای فراوانی برای آن وجود دارد.

انژکتور موتور سوخت مایع بیش‌تر از تعداد بسیار زیادی اجزا پاشش تشکیل شده که به‌طور منظم در کنار هم قرار می‌گیرند. صفحه انژکتور موتور راکت پیش‌رانش مایع در شکل ۱-۵ دیده می‌شود. بازده صفحه هر انژکتور بستگی به عملکرد هر اجزا و نحوه قرارگیری آن‌ها در کنار هم دارد. قرارگیری اجزا شامل محل قرارگیری آن‌ها نسبت به هم نیز زاویه پاشش آن‌ها نسبت به محور جریان است. در موتورهای موشک، برای سوخت مایع پیش‌رانه مایع از انواع گوناگونی از اجزاها استفاده می‌شود. برای مثال می‌توان به اجزاهای سر دوشی^۱، اجزاهای پیچشی^۲ و اجزاهای برخوردی^۳ اشاره کرد. از جمله موتورهایی که از اجزا برخوردی استفاده شده می‌توان به رداستون^۴، ژوپیترا^۵، اطلس^۶، ساوترن^۷ و آپولو^۸ اشاره کرد. استفاده فراوانی از اجزاهای برخوردی در صنعت می‌شود که نشان می‌دهد این اجزاها نسبت به اجزاهای دیگر، برتری‌های زیادی دارد [۹].

^۱Showerhead

^۲Swirl

^۳Impinging

^۴Redastone

^۵Jupiter

^۶Atlas

^۷Saturn

^۸Apollo



شکل ۱-۵- صفحه انژکتور موتور سوخت مایع [۹]

همان‌طور که شکل ۱-۵ مشاهده می‌شود انژکتورهای برخوردی کاربرد گسترده‌ای در تزریق سوخت در موتورهای پیرانش دارند. در شکل زیر، موتور F-1 در اولین مرحله از پرتاب پروژه آپولو ساوترن پنچ^۱ از انژکتورهای برخوردی در محفظه اصلی احتراق و ژنراتور گاز استفاده می‌کنند. در این‌جا، صفحه تزریق موتور را نشان می‌دهد که در آن تعداد زیادی اریفیس برای تولید تعداد زیادی جت‌های برخوردی تنظیم‌شده است. شکل ۱-۶ از آزمایش آب احتراق نشان می‌دهد [۱۰].



شکل ۱-۶- حضور انژکتورهای برخوردی در موتور F-1 در مرحله اول پرتاب Saturn V [۱۰]

اندرسون و همکاران [۱۱] در سال ۱۹۹۲ به بررسی پیکربندی هندسه انژکتور جت برخوردی پرداختند. بیش‌تر استفاده از جت‌های برخوردی برای موتورهای موشکی که از پیش‌ران‌های زیستی مایع قابل ذخیره استفاده می‌کنند، ترجیح داده می‌شود؛ با توجه به مزایای نسبی سادگی در طراحی، کنترل کیفیت و هزینه،

^۱Saturn V

^۲Impinging jet

ساخت پایین، این انژکتورها هم‌چنین می‌توانند انژکتورهای هم‌محور را جایگزین کنند که تکیه‌گاه اصلی جریان ترکیب پیش‌رانه‌های گاز و مایع هستند. در مقایسه با انژکتورهای هم‌محور^۱ طراحی انژکتورهای جت برخوردی، آسان و ساده است. علاوه بر این، انژکتورها می‌توانند به‌طور منطقی ترکیب خوبی را فراهم آورند. با این حال، ویژگی‌های عملکرد و محدودیت‌های عملیاتی باید براساس مطالعات دقیق باشند، مقالات کمی در این زمینه، وجود دارد. هم‌چنین مهم است که ویژگی‌های مکانیکی اساسی پاشش‌های چنین تزریق‌کنندگانی قبل از اینکه به عملکرد آن‌ها به‌عنوان اجزای موتور نگاه کنیم، درک شوند.

مگان و همکاران [۱۲] در سال ۱۹۷۰ دریکی از مطالعاتی که انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که عوامل غالب برای برخورد با گاز مایع که اندازه قطره را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند عبارتند از: نسبت تکانه تزریق‌شده جت، فشار دینامیکی گاز تزریق‌شده و نسبت قطر اریفیس. به‌نظر نمی‌رسد که این پیکربندی بعد توجه زیادی را به خود جلب کرده باشد اگرچه به‌نظر می‌رسد که پتانسیل کاربردی خاصی دارد و هم‌چنین دارای فیزیک بسیار جالبی است؛ بنابراین مطالعه حاضر این هندسه را با شناسایی دقیق پارامترهای تأثیرگذار اصلی و تلاش برای گروه‌بندی آن‌ها برای متحد کردن داده‌ها در اندازه پاشش، مجدداً بررسی می‌کند. گاز مورد‌استفاده هوا و آب مایع به نسبتی است که سوخت و اجزای اکسیدکننده پیش‌رانه‌ها در راکت‌ها را شبیه‌سازی می‌کند.

۱-۲- اتمیزاسیون و پاشش سوخت

پیش از بررسی جریان جت برخوردی و فرآیند اتمیزاسیون، ابتدا تعاریف اساسی ازجمله برای پارامترهای تأثیرگذار بر فروپاشی ارائه می‌شود. این مفاهیم به‌صورت اعداد بدون‌بعد تعریف شده هستند و در ادامه توضیح داده داده می‌شود.

^۱Co- Axial injector

۱-۲-۱- اعداد بدون بعد

اعداد بدون بعد در مبحث اتمیزاسیون و تزریق جت استفاده فراوانی می‌شوند. با بررسی تغییرات رفتار آن‌ها، اثر پارامترهای فیزیکی روی نتایج تست‌های مختلف را ببینیم. اعداد بدون بعد در مطالعه ویژگی‌های اساسی پاشش و اتمیزاسیون، در مدل‌های مختلف فروپاشی مورد توجه محققان قرار می‌گیرد. در ابتدا موضوع تزریق جت مایع به محیط آزاد و تزریق جت مایع به جت عرضی بررسی می‌شود [۱۳].

۱- **عدد وبر گاز:** عددی بدون بعد است که در دینامیک سیالات، به عنوان نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی شناخته می‌شود و اهمیت فراوانی در بخش فروپاشی جت و شکست قطره دارد. هرچه مقدار عدد وبر بیش‌تر باشد، نیروهای خارجی مخرب سیال، قوی‌تر از نیروی کشش سطحی می‌شود. این رابطه، شامل متغیرهای ρ_g چگالی گاز، V_g سرعت گاز، d قطر انژکتور و σ_l کشش سطحی مایع هست.

$$We_G = \frac{\rho_g V_g^2 d}{\sigma_l} \quad (1-1)$$

۲- **عدد وبر مایع:** این رابطه شامل متغیرهای ρ_l چگالی مایع و V_l سرعت جت مایع می‌باشد.

$$We_L = \frac{\rho_l V_l^2 d}{\sigma_l} \quad (2-1)$$

۳- **نسبت تکانه!** این پارامتر بدون بعد طبق رابطه زیر برابر با فشار دینامیکی جت گاز به فشار دینامیکی مایع هست.

$$MR = \frac{\rho_g V_g^2}{\rho_l V_l^2} \quad (3-1)$$

۴- **عدد رینولدز گاز:** کمیت بدون یکای مهمی است که در مکانیک سیالات برای پیش‌بینی الگوی جریان از آن استفاده می‌شود. این عدد نسبت نیروی اینرسی به نیروی گرانشی می‌باشد. این

رابطه شامل متغیرهای d قطر انژکتور و μ_g لزجت هوا می‌باشد.

$$Re_G = \frac{\rho_g V_g d}{\mu_g} \quad (4-1)$$

۵- عدد رینولدز مایع: این رابطه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Re_L = \frac{\rho_l V_l d}{\mu_l} \quad (5-1)$$

۶- عدد آنسورگ! این عدد بدون بُعد شده، وابسته به خواص مایع است، در واقع میزان تأثیر لزجت

مایع بر فروپاشی قطره توسط عدد آنسورگ بیان می‌شود. رابطه این عدد توسط فرمول زیر تعریف می‌شود.

$$Oh = \frac{\sqrt{We_l}}{Re_l} \quad (6-1)$$

به صورت خلاصه می‌توان بیان کرد که اگر تزریق فشار ساکن پیاده شود، جریان مایع از هم گسیخته شده و انتقال جرم، تکانه و انرژی گاز و مایع وابسته به خواص دینامیکی جریان سیال مایع است؛ اما اگر جت مایع به جریان گاز در حال حرکت تزریق شود، باعث تشکیل پاشش گسترده‌ای خواهد شد؛ هنگامی که جریان گاز با جت مایع در نقطه موردنظر برخورد می‌کنند، عامل به وجود آمدن عمل گسیختگی در جت مایع، تولید نیروی آیرودینامیکی وارد شده توسط جت گاز بر سطح مایع است.

۱-۲-۲- جریان مایع در جت عرضی

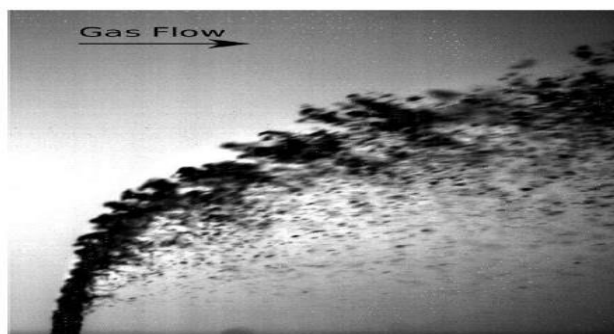
جریان جت‌های عرضی^۲ یکی از فیزیک‌های پرترفدار است که از سالیان گذشته مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است. روش مخلوط شدن دود و هوا در دودکش‌های نیروگاه‌های بزرگ جز اولین موضوعاتی بود که در زمینه جریان جت عرضی بررسی شد. تزریق جت مایع عمودی بر جریان گاز^۳ نوع خاصی از

^۱Ohnesorge number

^۲Cross Flow Jet

^۳Liquid Jet in Cross Flow

این جریان است که اهمیت زیادی در سیستم تزریق سوخت موتورهای پیشرفته هواپیما دارد. از مهم‌ترین کاربردها در این زمینه می‌توان به سیستم تزریق سوخت محفظه احتراق توربین گاز در محفظه‌های ال پی پی^۱، تزریق سوخت در پس سوزها^۲، انواع موتورهای رم جت^۳ و اسکرم جت^۴ اشاره کرد. تزریق جت به صورت مقطع عرضی به علت اتمیزاسیون^۵ قوی و نرخ تبخیر شدید از خاص‌ترین روش‌های تزریق سوخت در سیستم احتراق کامل است. جریان جت‌های عرضی در خنک کاری لایه ای^۶، تداخل با دانه‌های خروجی از برج خنک کننده^۷، دودکش‌های صنعتی و شعله‌های خروجی از لوله‌های چاه نفت کاربرد دارند. ساختار فرآیند تزریق جت مایع به جریان عرضی گاز در شکل ۱-۷ بیان شده است. در حیث مجموع، سیالی خروجی از انژکتور به صورت عمودی به جریان هوا با سرعت مشخصی خارج شده و به جت مایع برخورد می‌کند [۱۵].



شکل ۱-۷- تزریق جت مایع به جریان عرضی هوا [۱۵]

چهار نیرو اصلی بر فروپاشی جت مایع شامل $\rho L^2 V^2$ لختی، σL نیروی تنش سطحی و $\mu L V$ نیروی لزجت می‌شود. پارامترهای L ، V ، σ ، ρ و μ به ترتیب بر طول هندسه جت، سرعت محوری جت، چگالی، تنش سطحی و لزجت دینامیکی دارند. هم‌چنین اعداد بدون بعد شامل عدد آنسورگ، عدد

^۱LPP (Lean Premix Prevaporized)

^۲After Burner

^۳Ramjet

^۴Scramjet

^۵Atomization

^۶Film Cooling

^۷Cooling Tower

رینولدز و عدد وبر برای این نیروهای ذکر شده بیان می‌شوند.

۱-۳- انواع اتمیزاسیون جت

هنگام فروپاشی جت مایع فرآیندی وجود دارد که به واسطه آن جت مایع به قطرات ریز تبدیل می‌شود که به آن فرآیند اتمیزاسیون گفته می‌شود. دو نیرو بر سطح جت مایع وارد می‌شود که به آن‌ها نیروهای به هم پیوستگی^۱ و هم گسیختگی^۲ گفته می‌شود. هنگامی که نیروهای گسیختگی بر نیروهای پیوستگی غلبه می‌کند، جت مایع به فروپاشی می‌رسد. به بیان کامل‌تر این فرآیند می‌تواند به صورت اثر نیروهای داخلی و خارجی بر مایع تعبیر شود که باعث گسیختن و انقطاع اثرات به هم پیوستگی ناشی از کشش سطحی می‌شود [۱۶].

پروسه اتمیزاسیون شامل دو مرحله اصلی می‌شود:

(۱) اتمیزاسیون اولیه:^۳ جت مایع در آن به لیگامنت‌های نازک که به رشته‌های کوچک و بزرگ

معروف هستند و قطرات درشت‌تر تبدیل می‌شوند.

(۲) اتمیزاسیون ثانویه:^۴ در آن لیگامنت‌های شکل گرفته در اتمیزاسیون اولیه به اندازه‌های

مختلف تبدیل می‌شوند، سپس به قطرات درشت‌تر و بعد از آن به قطرات ریز تبدیل می‌شوند.

سه عاملی که بر مشخصات پاشش تأثیرگذار هستند شامل:

(۱) شکل و نوع انژکتور که مایع از آن پاشش می‌شود.

(۲) مشخصات خواص سیال گاز وارد شده به جت مایع

(۳) خواص فیزیکی مایع

^۱Consolidating Influence

^۲Disruptive Influence

^۳Primary Atomization

^۴Secondary Atomization

عوامل دیگری که بر ساختار پاشش موثر هستند که شامل جریان داخلی انژکتور، امواج سطحی جت، پروفیل سرعت در خروجی انژکتور و مسیر و آشفتگی در خروجی انژکتور است [۱۳].

۱-۳-۱- اتمیزاسیون اولیه

در سه رژیم فروپاشی اصلی برای اتمیزه شدن جت‌های هم‌محور گاز استفاده می‌شود. این رژیم‌های فروپاشی شامل فروپاشی نوع رایلی، فروپاشی نوع کیسه‌ای و فروپاشی نوع فیبر هستند. فروپاشی جت آب در این مطالعه فروپاشی غالب، فروپاشی کیسه‌ای و فروپاشی فیبر است. دسته‌بندی محدوده فروپاشی‌های موجود برای صفحه جت آب براساس عدد وبر بیان شده است [۱۷].

$$(1) \text{ رژیم فروپاشی مدل رایلی } We < 20$$

$$(2) \text{ رژیم فروپاشی مدل کیسه‌ای } 20 < We < 80$$

$$(3) \text{ رژیم فروپاشی مدل فیبر } We < 80$$

۱-۳-۲- اتمیزاسیون ثانویه

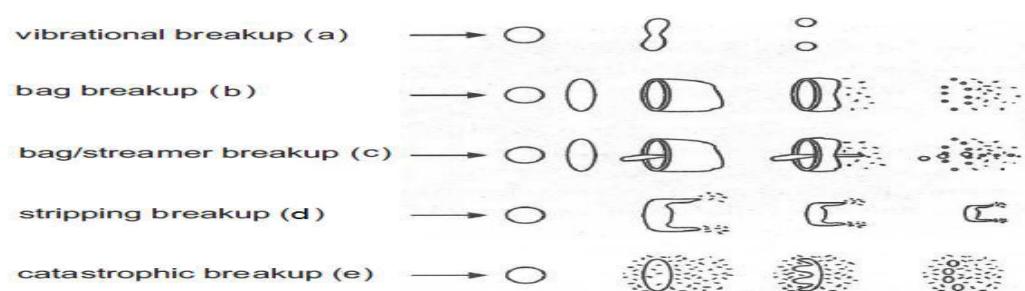
فروپاشی ثانویه نشان‌دهنده فرآیند تجزیه و فروپاشی قطرات موجود و لیگامنت‌های حاصل در اتمیزاسیون اولیه به قطرات کوچک‌تر، به دلیل نیروهای آیرودینامیکی ایجاد شده، توسط سرعت نسبی بین قطرات و گاز محیطی هست. قطرات ناشی از اتمیزاسیون اولیه در مسیر پایین‌دست جریان، حرکت می‌کنند و با زیاد شدن اثر نیروهای گسیختگی ناشی از حضور گاز، به قطرات بسیار ریز تبدیل می‌شوند [۱۸]. هنگامی که نیروهای آیرودینامیکی به اندازه کافی بزرگ باشد، این عامل منجر به تغییر شکل ناگهانی قطرات می‌شود و به فروپاشی می‌رسند و در نهایت به تعداد زیادی قطرات ریز تبدیل می‌شوند. وقتی یک قطره یا ذره در سیال فاز پیوسته حرکت می‌کند نیروهای متفاوتی بر آن وارد می‌شود. برخی از این نیروها اصطلاحاً نیروهای دائمی^۱ نامیده می‌شوند. سرعت نسبی قطره و سیالی فاز، باعث به

^۱ Drag

وجود آمدن نیرویی می‌شوند که به آن نیروی پسا می‌گویند. اما نیروهای دیگری نیز بر قطره وارد می‌شوند که به دلیل وجود شتاب نسبی^۱ بین قطره و سیال فاز پیوسته به وجود آمده و جرم مجازی آن، این نیروها به نیروهای گذرا معروف‌اند. با فرض صفر بودن شتاب نسبی^۲ به وجود می‌آیند؛ مانند نیروهای باست بین قطره و سیال فاز پیوسته می‌توان از نیروهای گذرا نیز صرف نظر کرد. این فرض در اغلب جریان‌های دوفازی پراکنده فرض قابل قبولی است. اعمال نیروهای پسای آیرودینامیکی اعم از فشاری و اصطکاکی باعث ایجاد تنش بر فصل مشترک قطره با محیط اطرافش می‌شود. نیروهای کشش سطحی با تنش‌های ایجاد شده در فصل مشترک مقابله می‌کنند اما اگر تنش‌های وارد شده بر جداره قطره از حد معینی تجاوز کنند، نیروهای کشش سطحی یارای مقابله ندارند و قطره خواهد شکست. فروپاشی قطره به شدت به عدد وبر جریان بستگی دارد، عدد وبر بیانگر نسبت نیروهای هیدرودینامیکی متلاشی کننده قطره به نیروهای پایدار کننده است که به صورت زیر توصیف می‌شود.

$$We = \frac{\rho_g v_{ril} d}{\sigma} \quad (Y-1)$$

در معادله فوق d قطر قطره، v_{ril} سرعت نسبی، ρ_g چگالی گاز و σ کشش سطحی بین مایع و گاز می‌باشد. با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته مشخص گردید که براساس مقدار عدد وبر فرآیندهای فروپاشی گوناگونی به وجود می‌آید که در شکل ۸-۱ نشان داده شده است.



شکل ۸-۱- نحوه فروپاشی قطرات [۱۸]

^۱Basset

نوع فروپاشی بر حسب عدد وبر به صورت زیر دسته بندی می شود:

$$(1) \quad We \leq 12 \Leftrightarrow \text{فروپاشی لرزشی.}$$

$$(2) \quad 12 < We \leq 50 \Leftrightarrow \text{فروپاشی کیسه ای.}$$

$$(3) \quad 50 < We \leq 100 \Leftrightarrow \text{فروپاشی کیسه ای-پرچی.}$$

$$(4) \quad 100 < We \leq 350 \Leftrightarrow \text{فروپاشی ورقه ای.}$$

$$(5) \quad We > 350 \Leftrightarrow \text{فروپاشی تخریبی.}$$

فروپاشی لرزشی در اعداد وبر کوچک اتفاق می افتد. در این حالت تغییر شکل قطرات باعث فروپاشی کامل نمی شود. در فروپاشی کیسه ای جریان گاز، خارج از قطره به مرکز آن راه می یابد. این عامل باعث اختلاف فشار بین مرکز قطره و محیط اطراف شده و با افزایش سرعت نسبی، نیروی اینرسی بر نیروی کشش سطحی غلبه نموده و در نتیجه، منجر به فروپاشی قطره می گردد. در فروپاشی کیسه-پرچی نیز یک جت کوچک سیال ظاهر شده که باعث کوچک تر شدن قطرات می شود. در روش فروپاشی ورقه ای، قطر قطره به تدریج کاهش می یابد؛ زیرا قطرات خیلی کوچک به علت نیروهای برشی به طور پیوسته، جدا می شوند. در این روش نیروهای آیرودینامیکی بر نیروی کشش سطحی غلبه نموده و قطرات از گوشه به سمت مرکز پخش می شوند. فروپاشی تخریبی به دلیل کاهش شدید سرعت، نوسانات قطرات با دامنه و طول موج بزرگ باعث فروپاشی شده و قطرات بزرگ تولید می شوند در همین هنگام موج های سطحی با طول موج کوتاه قطرات کوچک را به وجود می آورند.

۱-۴- پیشنهاد تحقیق

پژوهش ها، آزمایش ها و بررسی های گوناگونی در سال های گذشته برای شناخت فیزیک و پارامتر موثر بر رفتار و ویژگی های پاشش حاصل از جت های برخوردی صورت گرفته است که در زیر به برخی از مهم ترین کارهایی که در طول سالیان گذشته انجام شده، اشاره می شود.

ابراهیم و پکواس [۱۹] در سال ۱۹۹۱ به بررسی ویژگی‌های پاشش تولید شده، بعد از برخورد دو جت مایع پرداختند و قطر متوسط قطرات پاشش و نحوه توزیع آن‌ها را بررسی کردند و صفحه جت تشکیل شده از برخورد دو جت استوانه‌های هم قطر و هم تکانه را نیز مطالعه کردند. آن‌ها دو رژیم فروپاشی صفحه بین اعداد وبر ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که فروپاشی صفحه در اعداد وبر کم با موج‌های تیلور نیز فروپاشی آن در اعداد وبر بیش‌تر از ۲۰۰۰ با موج‌های ناپایدارکننده کلوین-هلمهولتز^۱ وابسته هستند. برای پیش‌بینی اندازه قطرات ناشی از فروپاشی صفحه جت اعداد بیش‌تر از ۲۰۰۰ از بررسی ناپایداری کلوین-هلمهولتز ریاضی موجود استفاده شده است.

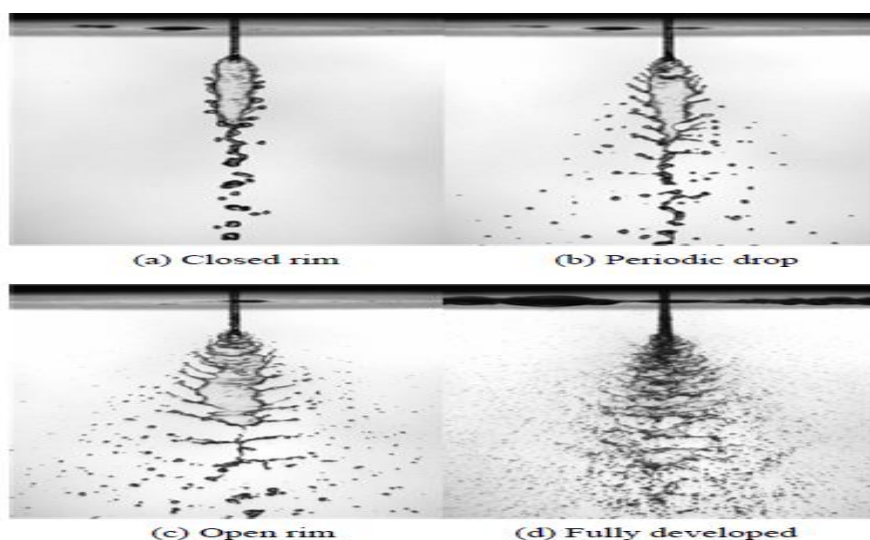
بائک و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۱ مطالعه‌ای بر روی سیستم اتمیزاسیون با دو جت مشابه را برای ماده ژل دارای نانوذرات انجام دادند. آن‌ها اثر خواص رئولوژی^۲ را با انجام آزمایش‌هایی با آب و ژل کاربوپل^۳ با و بدون نانوذرات بررسی کردند. نتایج نشان دادند که بسته به نوع سیال عامل، مشخصات ناپایداری کاملاً متفاوت هستند. آن‌ها الگوهای پاشش را در سه حالت پاشش آب، ژل کاربوپل بدون نانوذرات و ژل کاربوپل با نانوذرات بررسی کردند و الگوی منحصر به فردی را برای ژل کاربوپل با نانوذرات مشاهده کردند. مطالعه روی طول فروپاشی مایع بدون بُعدشده نشان داد که استفاده از نانو ذرات باعث کاهش طول فروپاشی بدون بُعدشده می‌شود، هم‌چنین افزایش عدد وبر ابتدا با افزایش و سپس با کاهش طول فروپاشی بدون بُعدشده همراه است. آن‌ها کاهش قطر متوسط ساوتر با عدد وبر اصلاح شده تا یک مقدار ثابت را گزارش کردند.

^۱Kelvin-Helmholtz instability

^۲Rheological properties

^۳Carbopol gel

لی و همکاران در سال ۲۰۰۹ فروپاشی و تشکیل پاشش دو جت مایع در یک جریان عرضی کم سرعت را به صورت تجربی مطالعه کردند و اثر جریان عرضی بر فروپاشی صفحه جت مایع، اتمیزاسیون و تشکیل پاشش را بررسی کردند. آن‌ها از عدد وبر و نسبت تکانه برای بررسی پارامترهای مورد نظر استفاده کردند. در آزمایش‌های انجام شده، نرخ جریان مایع و سرعت جریان عرضی گاز به ترتیب در بازه‌های ۱/۴-۹/۶ گرم بر ثانیه و ۶-۴۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. ابتدا اتمیزاسیون در هوای ساکن را بررسی کردند و با تغییر عدد وبر، فروپاشی جت مایع را به چهار الگوی پاشش لبه بسته^۱، قطره متناوب^۲، لبه باز^۳ و کاملاً توسعه یافته^۴ دسته‌بندی کردند و سپس اثر جریان عرضی را بر الگوی پاشش بررسی کردند. آن‌ها نسبت تکانه مایع به هوای مختلف را در اعداد وبر متفاوتی بررسی کردند. طول فروپاشی مایع تحت اثر عدد وبر و نسبت تکانه بررسی شد و افزایش آن با افزایش سرعت جریان عرضی هوا گزارش شد. افزایش عدد وبر با افزایش طول فروپاشی تا مقدار بیشینه آن و سپس کاهش تا مقداری ثابت همراه شد. آن‌ها همچنین اندازه قطرات را در شرایط مختلف بررسی کردند.



شکل ۹-۱- الگوهای پاشش دسته‌بندی شده توسط لی و همکاران [۲۰]

^۱Closed rim

^۲Periodic drop

^۳Open rim

^۴Fully developed

چن و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۱۳ شبیه‌سازی عددی برای مطالعه تشکیل و فروپاشی صفحه‌های مایع ایجاد شده توسط دو جت مایع با استفاده از روش بهبود یافته حجم سیال^۱ را انجام دادند. از روش بهبود یافته حجم سیال همراه با چند تکنیک پالایش مش تطبیقی^۲ استفاده شد. در بازه وسیعی از اعداد رینولدز و وبر فیزیک جریان بررسی و با نتایج تجربی مقایسه شد. نتایج بیانگر الگوهای گوناگون صفحه و اتمیزاسیون در شرایط عملیاتی مختلف بود. آن‌ها الگوهای پاشش در سرعت‌های مختلف جت را گزارش کردند.

دومبروفسکی و هوپر [۲۲] در سال ۱۹۶۳ مطالعه‌ای بر عوامل مؤثر بر فروپاشی صفحه مایع تشکیل شده، توسط دو جت مایع در جریان آرام و آشفته، انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند که فروپاشی صفحه جت عمدتاً به علت تشکیل موج‌های ناپایدار آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که موج‌های هیدرودینامیکی وقتی به وجود می‌آیند که عدد وبر هر جت بیش‌تر از حد بحرانی باشد و این نتیجه نیز مستقل از عدد رینولدز است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$We = \frac{\rho_L R U^2 (\sin \theta)^2}{\sigma} \quad (۸-۱)$$

که در آن R شعاع جت، ρ_L چگالی جت‌های مایع، U سرعت جت و تنش سطحی است. آن‌ها به طور تجربی آزمایشاتی را بر اثر چگالی محیط بر فرآیند تشکیل قطره انجام دادند. آن‌ها در آخر قطر قطرات را در رژیم‌های مختلف جریان و در زاویه‌های متفاوت برخورد، به دست آوردند.

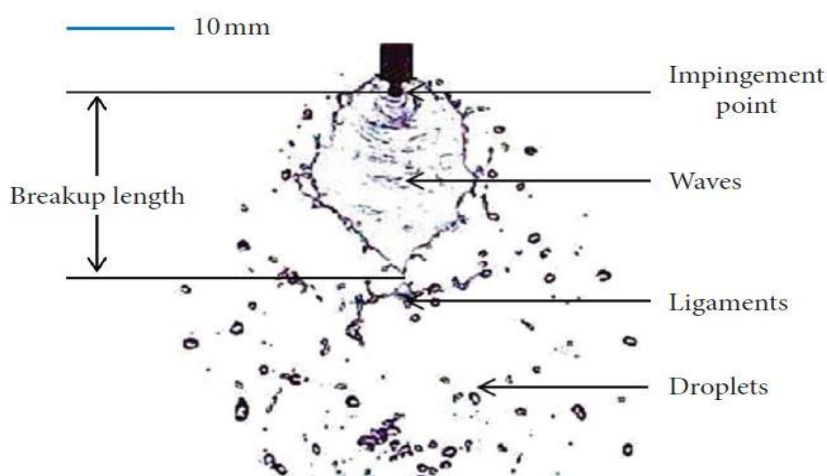
لای و همکاران [۲۳] در سال ۱۹۹۹ به طور آزمایشگاهی برخورد جت‌های یکسان آب را توسط لیزر عکس‌برداری کردند و چهار الگوی مختلف جریان برای پاشش ارائه دادند. آن‌ها نیز توزیع سرعت و اثرات تغییرات سرعت و زاویه برخورد بر مشخصه‌های صفحه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها همچنین

^۱Improved Volume of Fluid (VOF)

^۲Adaptive Mesh Refinement (AMR)

ویژگی‌های اتمیزاسیون و اندازه قطر قطره را نیز بررسی کرده و اطلاعات خود را با نتایج آقایان دومبروسکی و هوپر مقایسه کردند.

ژیا و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۱۹، آزمایش‌ها تجسم جریان برای مطالعه رژیم‌های جریان و طول فروپاشی صفحه آب تولیدشده، توسط دو جت مایع برخوردکننده از یک انژکتور ساخته‌شده از دو لوله یکسان به قطر ۰/۶۸۶ میلی‌متر انجام‌شده است. آزمایش‌ها روی اعداد رینولدز جت مایع براساس قطر لوله مایع در محدوده ۱۵۴۱ تا ۵۳۹۴ انجام شده‌است. تأثیر سرعت جت و زاویه برخورد بین دو جت بر عملکرد فروپاشی نیز بررسی شده‌است. چهار الگوی پاشش شناسایی شده‌اند که عبارتند از: رژیم تشکیل پیش صفحه جت، صفحه جت صاف، صفحه جت آشفته و رژیم‌های صفحه جت لبه باز. در محدوده نسبتاً بالای عدد وبر، طول فروپاشی به یک مقدار ثابت به سمت افزایش عدد وبر تمایل دارد و برخی اختلافات بین پیش‌بینی‌های نظری و تجربی وجود دارد. مساحت صفحه آب اندازه‌گیری شده با افزایش اعداد رینولدز جت مایع و زاویه برخورد در محدوده مطالعه حاضر افزایش می‌یابد. شکل ۱-۱۰- نمای جلویی صفحه جت مایع در صفحه (Y - Z) گرفته‌شده توسط دوربین سرعت بالا را نشان می‌دهد. در جایی که دو جت آب به یکدیگر برخورد می‌کنند را نقطه برخورد می‌نامند. فاصله نقطه برخورد تا نوک صفحه جت آب شکسته نشده، طول فروپاشی تعریف می‌شود.



شکل ۱-۱۰- نمای جلوی صفحه جت آب (با سرعت جت ۷۷/۶ متر بر ثانیه و زاویه برخورد ۹۰ درجه [۲۴])

مایر [۲۵] در سال ۱۹۹۴ آزمایش‌های مختلفی روی اتمیزاسیون جت مایع انجام داد. او به‌طور مداوم جت‌های مایعی را در محیط ساکن تخلیه می‌شدند، مورد تحقیق قرارداد و بعد از آن اتمیزاسیون جت‌ها را در محیط با جریان موافق با جریان جت مورد بررسی و تست قرارداد. با تصویربرداری از جت‌های آب در محیط ساکن در سرعت‌های متفاوت، تغییر شکل‌ها و موج‌های شکل گرفته را بررسی کردند. اینگلبرت و همکاران [۲۶] در سال ۱۹۹۵ فروپاشی جت مایع احاطه‌شده با جریان هوای هم-محور در هندسه‌های مختلف انژکتور را به‌صورت تجربی مطالعه کردند. اثر نسبت انرژی جنبشی و تکانه هوا به مایع، عدد رینولدز جریان‌های جت هم-محور هوا و آب و عدد وبر بر طول فروپاشی، فرکانس و توزیع اندازه و سرعت قطرات مطالعه شد.

لاشراس و ویلرماکس [۲۷] در سال ۱۹۹۸ مطالعه تجربی روی فروپاشی مایع در نواحی نزدیک و دور از جت حلقوی هوا و آب را انجام دادند. از ناپایداری‌های ناحیه نزدیک به جت برای بررسی مکانیزم فیزیکی فروپاشی مایع اصلی استفاده کردند و با اندازه‌گیری اندازه و سرعت قطرات، اتمیزاسون ثانویه در ناحیه دورتر از جت را مورد تحقیق قرار دادند. نسبت تکانه آب به هوا، عدد وبر و عدد رینولدز هوا و آب از پارامترهای استفاده‌شده در این مطالعه بود.

لاشراس و هاپفینگر [۲۸] در سال ۲۰۰۰ مطالعه مروری بر اثر عدد رینولدز مایع، عدد وبر آیرودینامیکی و نسبت شار تکانه بین جریان گاز و مایع بر الگوهای جریان فروپاشی مایع را در جت هم-محور مایع و گاز انجام دادند.

وارگا و همکاران [۲۹] در سال ۲۰۰۳ اتمیزاسیون جت مایع و هوا هم-محور با نسبت قطر انژکتور هوا به مایع بزرگ (از مرتبه ۱۰۰ تا ۱۰۰۰) را به‌صورت تجربی بررسی کردند. آزمایش‌های انجام‌شده، نشان دادند که ناپایداری‌ای در فاصله بسیار نزدیک به خروجی انژکتور آشکار می‌شود.

کورماتیز و مسری [۳۰] در سال ۲۰۰۶ اثر پارامترهای آشفته‌گی مانند آشفته‌گی فازگازی و برش

متوسط بر فروپاشی اصلی را به صورت مجزا بررسی کردند. آزمایش‌های انجام‌شده نشان دادند که نسبت عدد وبر آشفته به عدد وبر متوسط مانند شدت آشفته‌گی، پارامتر مؤثری است؛ هم‌چنین تأثیر زیاد طول فروپاشی اصلی بر سرعت متوسط، سطح آشفته‌گی و نسبت جرم سوخت به هوا نیز مشاهده شد. رودینی و وزنیاک [۳۱] در سال ۲۰۱۸ مطالعه‌ای تجربی بر روی انژکتورهای هوا-وزش^۱ انجام دادند. آن‌ها اثر هندسه انژکتور و محدوده وسیعی از شرایط عملیاتی هم‌چون فشار هوا و نرخ جریان مایع را بررسی کردند.

لیو و همکاران [۳۲] یک انژکتور هوا-وزش با جریان‌های هم محور را به صورت تجربی مورد بررسی قرار داده و مشاهده کردند که تغییر قطر انژکتور مایع قطر متوسط قطرات را تغییر می‌دهد و این تغییرات با افزایش نسبت جریان جرمی مایع به گاز، بیش‌تر می‌شود. آن‌ها هم‌چنین نشان دادند که با ثابت نگه‌داشتن نسبت شار جرمی مایع به گاز، تغییرات قطر متوسط ساوتر برحسب عدد وبر، سرعت تزریق مایع و نسبت شار تکانه گاز به مایع، روند یکنواخت نداشته و این روند ابتدا نزولی و سپس صعودی می‌شود.

سین‌ها و همکاران [۳۳] در سال ۲۰۱۵ یک انژکتور هوا-وزش با جریان‌های عرضی را به صورت تجربی مطالعه کردند و نشان دادند که عمق نفوذ پاشش وابسته به تکانه گاز به مایع است. این پارامتر در نسبت تکانه‌های بالاتر افزایش‌یافته و پراکندگی پاشش بیش‌تر می‌شود. آن‌ها هم‌چنین نشان دادند که با فاصله گرفتن از دیواره اتمایزر، قطر متوسط ساوتر افزایش‌یافته در حالی که با حرکت در راستای جریان پرسرعت گاز این پارامتر کاهش پیدا می‌کند.

ما و همکاران [۳۴] در سال ۲۰۱۴ دو نوع انژکتور هوا-وزش که دارای شاکله متفاوتی در زمان مخلوط‌شدن مایع و گاز بودند، به صورت عملی مورد تست قرار دادند. آن‌ها پارامترهای فشار هوا، فشار مایع و نحوه مخلوط‌شدن مایع و گاز بر زاویه پاشش و سرعت قطرات را مورد بررسی قرار دادند. نتایج

^۱Air-blast atomizers

بررسی آن‌ها نشان داد زاویه پاشش شدیداً به جریان گاز بستگی دارد همچنین فشار مایع تأثیر بسیار کمی بر زاویه پاشش و سرعت قطرات می‌گذارد.

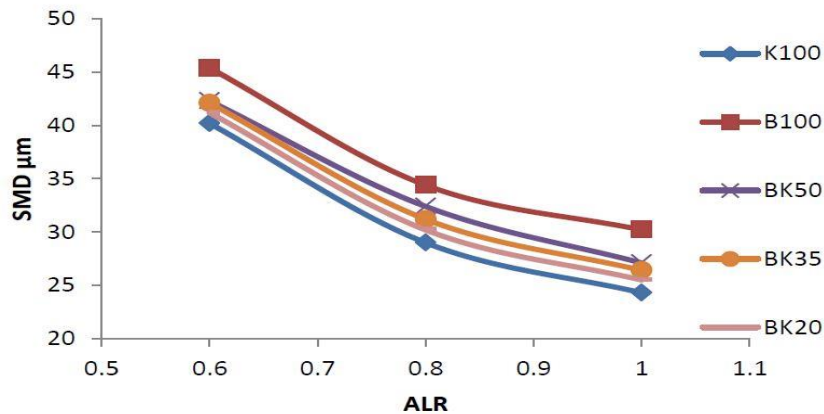
فایث و همکارانش [۳۵] در سال ۱۹۹۵ شاکله و ویژگی‌های فرآیند فروپاشی پاشش را مورد تحقیق قرار دادند و فرآیند فروپاشی جت را به دو مرحله، فروپاشی اولیه و فروپاشی ثانویه، تقسیم کردند. فروپاشی اولیه شامل جدا شدن لیگامنت‌ها و قطرات بسیار بزرگ از مرکز مایع و فروپاشی ثانویه شامل جدایش ذرات بزرگ به قطرات کوچک‌تر است.

آقای الخادیم محمد حسن و همکارانش [۳۶] در سال ۲۰۱۹ انژکتور دو سیاله^۱ برای اتمیزه کردن سوخت طراحی و ساختند. اندازه قطرات ساوتر در پاشش که از طریق انژکتور تولید شده به صورت تجربی اندازه‌گیری شد. آن‌ها آزمایش‌های گوناگونی برای انواع مختلف سوخت مایع، همچنین مقدار جریان جرم هوا به مایع^۲ برای بررسی اثرات این پارامترها بر روی اندازه قطرات ساوتر انجام دادند. از نرم افزار متلب^۳ به روش پردازش تصویر برای شناسایی و بهبود تشخیص قطرات کوچک استفاده کردند. آن‌ها به منظور بررسی صحت نتایج، نتایج کار حاضر همراه با داده‌های مختلف را با نتایج تجربی منتشر شده برخی محققان مقایسه کردند. نتایج فعلی قطر متوسط ساوتر در B100 نشان می‌دهد که آن‌ها دارای روند منحنی یکسان با توجه به جریان جرم هوا به مایع و نوع سوخت به ویژه با آقای لیگ و لورزنتو [۳۷] و آقای لفیبرو [۳۸] هستند. نتایج آقای کایو و همکاران [۳۹] مقادیر قطر متوسط ساوتر پایین‌تری به دلیل تفاوت هندسه در انژکتور و شرایط آزمایشات را نسبت به کار حاضر نشان دادند.

^۱Twin-fluid atomizer

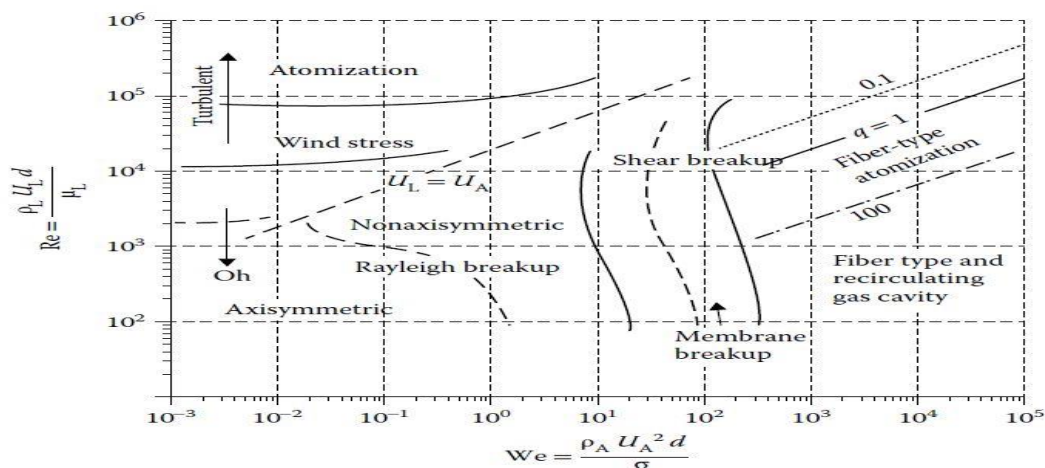
^۲ALR

^۳Matlab Software



شکل ۱۱-۱- مقایسه نتایج فعلی قطر متوسط ساوتر با نتایج منتشر شده [۴۶]

هافینگر [۴۰] در سال ۱۹۹۸ یک نمودار رژیم فروپاشی انژکتور هوا هم‌محور^۱ با استفاده از فضای $Re-We$ ایجاد کرد که مرجع مایعات خاص استفاده‌شده را حذف می‌کند. عدد بدون بُعد شده اونسورگ^۲ با شماره آیرودینامیکی وبر جایگزین شده است، که نشان می‌دهد خواص فاز گاز بحرانی تر می‌شود، این مورد به فاز گاز در اتمیزاسیون کمک می‌کند. این نمودار در شکل ۱-۱۲- نشان‌دهنده اتمیزاسیون با رژیم‌های مشخص‌شده در مطالعه حاضر با استفاده از آب است. هرچه به سمت راست نمودار حرکت کنیم؛ یعنی عدد وبر و رینولدز بیش‌تر شود، کیفیت فرآیند اتمیزاسیون بهبود می‌یابد.

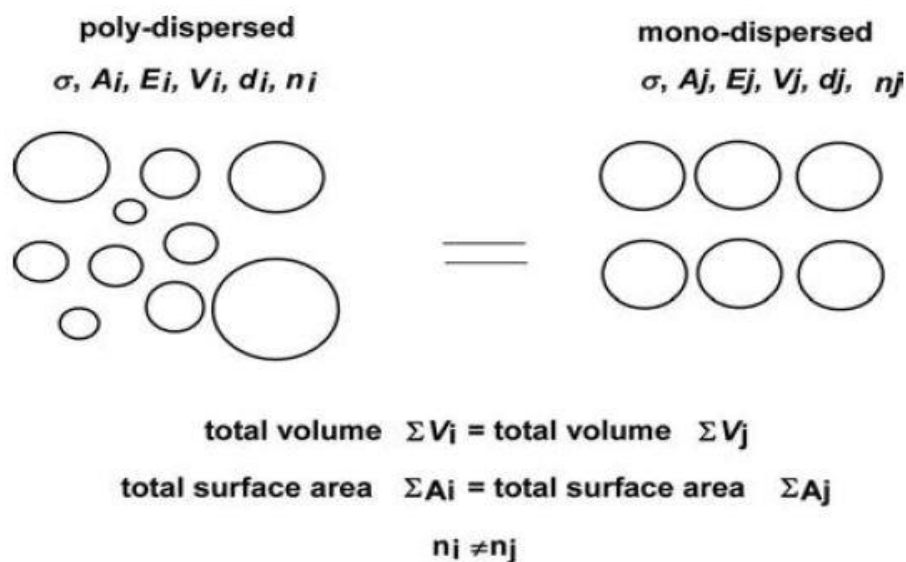


شکل ۱-۱۲- رژیم‌های فروپاشی در فضای پارامتر $Re-We$ [۴۰]

^۱ Co-axial Air-blast

^۲ Ohnesorge number

آقای کوالزوک و همکارانش [۴۱] در سال ۲۰۱۶ تعریف فیزیکی برای محاسبه قطر متوسط ساوتر برای اشکال کروی ارائه دادند. قطر مجموعه‌ای از اشیا کروی با اندازه‌های مختلف مانند ذرات، قطرات و حباب‌ها را می‌توان با یک مقدار واحد به نام قطر متوسط نشان داد. راه‌های زیادی برای محاسبه و بیان قطر متوسط ذرات وجود دارد. یکی از آن‌ها قطر متوسط ساوتر است که قطر متوسط سطح-حجم نیز نامیده می‌شود. این قطر به‌طور گسترده در نشریات متعددی بدون توجه به معنای فیزیکی آن مورد استفاده قرار گرفته‌است. در این مقاله، معنای فیزیکی قطر متوسط جسم کروی استخراج و ارائه شد. قطر متوسط ساوتر مجموعه‌ای از اشیا کروی با اندازه‌های مختلف برابر با قطر اشیا کروی هم‌اندازه است که یک مجموعه را تشکیل می‌دهند. سیستم‌های چند سایز و هم‌اندازه دارای تعداد مختلفی از اشیا کروی، مساحت سطح کل یکسان و حجم کل یکسان هستند. اگر انرژی سطحی همه کره‌های هر دو سیستم یکسان باشد، می‌توان آن‌ها را انرژی‌دار نامید.



شکل ۱-۱۳- معنای فیزیکی قطر متوسط ساوتر [۴۱]

روش محاسبه، قطر متوسط مجموعه‌ای از اشیا با اندازه‌های مختلف با در نظر گرفتن حجم و مساحت سطح توسط آقای ساوتر [۴۲] در سال ۱۹۲۶ در هنگام برخورد با قطرات روغن سوخت

معرفی شد. هم‌چنین قطر متوسط ساوتر به‌عنوان قطر متوسط سطح-حجم شناخته می‌شود و

معادله زیر توسط آقای پاکک و همکاران [۴۳] در سال ۱۹۹۸ تعریف می‌شود:

$$D_{\Sigma} = \frac{\int_{d_{min}}^{d_{max}} d^3 q(d) dd}{\int_{d_{min}}^{d_{max}} d^2 q(d) dd} \quad (9-1)$$

که در آن d_{min} و d_{max} به‌ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر قطر منحنی فرکانس را نشان می‌دهند که هیستوگرام $q(d)$ نیز نامیده می‌شود.

برای ذراتی که با کسر اندازه مشخص می‌شوند، قطر متوسط ساوتر را می‌توان با استفاده از فرمول زیر محاسبه کرد:

$$D_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^n n_i d_i^2} \quad (10-1)$$

که در آن n_i و d_i به‌ترتیب تعداد و قطر ذرات معلق در یک کسر ذره‌ای هستند؛ بنابراین، قطر متوسط ساوتر بیانگر قطر متوسط ذرات چند پراکنده با در نظر گرفتن نسبت حجم به سطح است و باید معنای فیزیکی داشته باشد.

انرژی سطح E_i یک جسم کروی متغیر n_i برای سیستم‌های پراکنده، مانند حباب، قطره و ذرات به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E_i = \sigma \cdot A_i \quad (11-1)$$

که در آن σ کشش سطحی را نشان می‌دهد و A_i سطح است. مساحت، کل انرژی سطح اجسام کروی، مجموعه‌ای با قطر یکسان در اندازه ذرات کسر :

$$\sum_{i=1}^n E_i = \sigma \cdot \sum_{i=1}^n n_i \cdot A_i \quad (12-1)$$

مساحت سطح مقطع A_i :

$$A_i = \pi \cdot d_i^2 \quad (13-1)$$

برای مجموعه‌ای از اشکال کروی شامل اشیا یکسان با قطر یکسان d_j ، انرژی کل سطح برابر است با E_j :

$$E_j = \sigma \cdot A_j \cdot n_j \quad (14-1)$$

که در آن n_j تعداد حوزه‌های مشابه ($j=1, 2, 3, \dots, n$) در مجموعه را نشان می‌دهد که مساحت سطحی یکسانی دارند:

$$A_j = \pi \cdot d_j^2 \quad (15-1)$$

دو مجموعه از اشیا کروی، یکی با اندازه‌های یکسان معادله ۱-۱۴ و دیگری با اندازه‌های مختلف معادله ۱-۱۲، انرژی‌های سطحی یکسانی دارند $E_i = E_j$ و سپس:

$$n_j \cdot d_j^2 = \sum_{i=1}^n n_i \cdot d_i^2 \quad (16-1)$$

فرض بر این است که تعداد اشیا کروی یکسان n_j برابر است با $(\sum V_i / V_j)$ ، که در آن حجم کل

مجموعه با اندازه‌های مختلف V_i برابر است با:

$$\sum V_i = \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^n n_i \cdot d_i^3 \quad (17-1)$$

حجم کل برای مجموعه با اندازه یکسان V_j :

$$\sum V_j = \frac{\pi}{6} d_j^3 \quad (18-1)$$

معادلات (۸) - (۱۰) رابطه را فراهم می‌کنند:

$$\sum_i^n n_i \cdot d_i^3 = d_j^3 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n n_i \cdot d_i^3}{d_j^3} \quad (19-1)$$

معادله زیر به قطر متوسط ساوتر معروف است:

$$d_j = D_{\text{ص}} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i \cdot d_i^3}{\sum_{i=1}^n n_i \cdot d_i^2} \quad (20-1)$$

۱-۵- بیان کلیات مسئله

بررسی رفتار و الگوی پاشش تشکیل شده تحت تأثیر میدان جریان سیال اطراف آن و تأثیر گذاری کمی پارامترهای آن به عنوان موضوع اصلی این تحقیق مدنظر خواهد بود. این بررسی به وسیله تزریق جریان جت هوا در جت آب انجام خواهد شد. رویکرد حل این بررسی، انجام آزمایش‌های تجربی است. در طول آزمایش با استفاده از روش‌های فیلم برداری و عکس برداری پرسرعت، تصاویر مختلف از الگوهای پاشش حاصل شده از برخورد انژکتورهای هوا و آب گرفته خواهد شد. بررسی پارامتریک بر تغییر شدت جریان حجمی آب، شدت جریان جرمی هوا و زاویه برخورد بین دو جت است و تمرکز بررسی بر اتمیزاسیون اولیه و ثانویه است و رژیم‌های مختلف فروپاشی جت‌ها و نحوه پاشش، مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

در این پژوهش با استفاده از روش‌های پردازش تصویر نرم افزارهای مهندسی زاویه مخروط پاشش، طول فروپاشی آب، اندازه و سرعت قطره محاسبه خواهد شد. یکی از پارامترهای مهم در بررسی این پژوهش، بررسی بازده و عملکرد اتمیزاسیون است. با استفاده از روابط مختلف این پارامتر به دست آمد.

۱-۶- صورت مسئله

اتمیزاسیون با دو سناریو باعث فروپاشی مایع به ساختارهای کوچک تر مانند قطره می شود. انرژی داخلی (جنبشی و دیگر انواع انرژی) خود مایع و یک انرژی خارجی (جریان گاز پرسرعت یا یک دستگاه مکانیکی) دو مکانیزمی هستند که باعث فروپاشی مایع می شوند. شناخت عوامل و پارامترهای مؤثر بر اتمیزاسیون برای مطالعه و بهبود عملکرد آن از اهمیت بالایی دارد. متوسط وزنی قطر متوسط ساوتر^۱ شار حجمی^۲

^۱Weighted spatially averaged Sauter Mean Diameter (SMD)

^۲Volume flux

طول فروپاشی مایع^۱ نسبت هوا به مایع^۲ نسبت شار تکانه هوا به آب^۳ نسبت تکانه هوا به آب^۴ نسبت نرخ جریان جرمی هوا به آب^۵ عدد وبر^۶ و عدد رینولدز^۷ زاویه پاشش^۸ زاویه انحراف^۹ و زاویه واگرایی^{۱۰} از جمله پارامترهای مهمی هستند که در مطالعه اتمیزاسیون مورد توجه هستند. در این پژوهش به صورت تجربی نحوه تشکیل و رفتار پاشش بر اثر برخورد جت های هوا و آب در سرعت های مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت. به این صورت ستاپ آزمایشگاهی ساخته شده است و از مخلوط هوا و آب برای انجام تست ها بر انژکتورهای اریفیزی در شرایط اتمسفر استفاده می شود.

تجهیزات مورد استفاده در این تحقیق آزمایشگاهی شامل دوربین سرعت پرسرعت^{۱۱} انژکتورهای هوا و آب، کمپرسور هوا، پرژکتور و شدت جریان سنج می شود. تکنیک مورد استفاده جهت انجام آزمایش ها، از روش عکس برداری پرسرعت و روش نوردهی پس زمینه، مورد استفاده قرار خواهد گرفت. دوربین پرسرعت می تواند تصاویر پاشش تولید شده، توسط برخورد جت های آب-هوا با نرخ جریان های مختلف را با کیفیت متفاوت ثبت و تند به یک کامپیوتر ارسال نماید.

۷-۱- ضرورت انجام تحقیق

تلاش های بسیاری در سال های اخیر برای شناخت فیزیک و عوامل مؤثر بر جریان پاشش حاصل از جت های برخوردی شده است؛ با توجه به اهمیت موضوع، تأمین رطوبت تحت فشار بالا و جلوگیری از تشکیل ذرات

^۱Liquid Breakup Length

^۲Gas to Liquid Ration (GLR)

^۳Air to Liquid Momentum Flux Ratio (ALMFR)

^۴Air to Liquid Momentum Ratio (ALMR)

^۵ALR

^۶Weber number

^۷Reynolds number

^۸Spray angle

^۹Deflection angle

^{۱۰}Divergence angle

^{۱۱}High speed camera

به صورت قطرات مایع در کاربری‌های تهویه مطبوع و امکان ایجاد جریان ثانویه برای دستیابی به شرایط مطلوب‌تر، لازم است شناخت دقیق‌تری از رفتار ذرات مایع تحت تأثیر میدان جریان سیال داشته باشیم؛ از این رو درک صحیح پدیده‌ی پاشش در افشانه‌ها و اتفاقی که برای قطرات در حین و بعد از برخورد باهم رخ می‌دهد، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است؛ با توجه به اهمیت انژکتورهای برخوردی به تلورانس‌های ساخت، نیاز است امروزه مطالعات زیادی بر انژکتورهای برخوردی انجام گیرد. تفاوت سرعت دو جت هوا و آب با اعمال مقادیر مختلف شدت جریان عبوری از انژکتور و عدم محوریت این دو جت از نظر برخورد در صفحه پاشش مطالعه شده و الگوهای پاشش مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۸- نوآوری مسئله

تاکنون مطالعات تجربی مختلفی بر رفتار پاشش حاصل از برخورد دو جت انجام شده است؛ اما مطالعه روی نحوه چگونگی تغییر فاز پاشش موضوعی تازه است و تحقیقات انگشت‌شماری بر موضوع جت‌های برخوردی انجام شده است؛ با توجه به امکانات آزمایشگاهی موجود، مهم‌ترین هدف این مطالعه پیدا کردن مدلی قابل اجرا برای بررسی نحوه تغییر فاز پاشش هنگام برخورد جت آب در جت هوا است. در این پژوهش برای بررسی رفتار پاشش از انژکتورهای برخوردی استفاده شد. انژکتورهای مخصوص این بررسی طراحی و ساخته شده است. برای به دست آوردن اندازه قطر، نحوه توزیع و سرعت قطرات از کد نوشته شده توسط نرم افزار لب ویو استفاده شد. برای تخمین سرعت قطرات با تعداد زیاد، از روش آماری استفاده شد. روش کار، بدین صورت است که در هر فریم قطرات آنالیز و اندازه قطرات مشخص می‌شود. از مجموع دو فریم متوالی که قطرات بر هم منطبق شده‌اند و میزان جابه‌جایی قطرات به دست می‌آید؛ با توجه به مشخص بودن زمان، سرعت میانگین حساب می‌شود. بازده و عملکرد اتمیزاسیون موضوعی جدید در مورد انژکتورهای برخوردی است که در این پژوهش، مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل ۲: تئوری و فزیک مسد

در این فصل به معرفی فیزیک و هندسه حاکم بر پدیده برخورد دو جت هوا و آب پرداخته می‌شود. در آخر نیز مقادیری که برای مقایسه با نتایج تجربی نیاز است، استخراج شده است.

۲-۱- ویژگی‌های اتمیزاسیون با دو جت مایع به کمک هوا

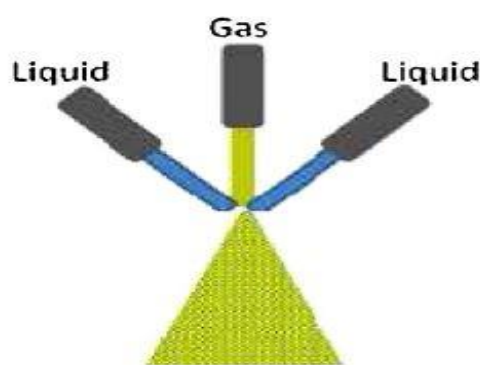
آوولاپاتی و راویکریشنا [۴۴] در سال ۲۰۱۳ سیستم جدیدی برای اتمیزاسیون جت برخوردی به کمک هوا به وجود آوردند که در آن یک جت گاز به سمت نقطه برخورد دو جت مایع هدایت می‌شود، پیشنهاد و به صورت تجربی انجام داده است. برای مطالعه حاضر اثر خواص مایع بر این حالت اتمیزه شدن، انواع سیالات مختلف با تغییر در ویسکوزیته و کشش سطحی مورد استفاده قرار گرفته شده است.

اثر خواص مایع مانند ویسکوزیته و کشش سطحی، زاویه بین جت‌های مایع و قطر روزنه جت گاز بر مشخصات پاشش بررسی شده است. نتایج نشان داد که با تغییر زاویه بین جت‌ها مایع، مدل اتمیزاسیون تغییری نمی‌یابد و تنها بر زاویه پاشش اثر می‌گذارد، هم‌چنین ویسکوزیته عامل اثرگذارتری نسبت به کشش سطحی گزارش شد. مایعات ویسکوزیته بالاتر زوایای پاشش کم‌تری را نشان می‌دهند. کاهش قطر روزنه انژکتور گاز منجر به افزایش اندازه حرکت جت گاز می‌شود که به نوبه خود باعث بهبود اتمیزاسیون در همه شرایط می‌شود.

یک مورد بسیار جالب این است که مقدار متوسط قطر ساوتر^۱ ثابت فراتر از نسبت گاز بحرانی به مایع^۲ و نسبت اندازه حرکت برای یک تغییر بزرگ در ویسکوزیته مایع و کشش سطحی است. به طور خاص، قطر متوسط ساوتر پاشش به دست آمده با سیستم جدید پیشنهادی در محدوده ویسکوزیته از ۱ تا ۳۹ میلی پاسکال بر ثانیه و کشش سطحی از ۲۲ تا ۷۲ میلی نیوتون بر ثانیه، ثابت است.

^۱Sauter mean diameter

^۲GLR



شکل ۲-۱- سیستم پیشنهادی برای پاشش سه جت برخوردی [۴۴]

اینوئه و همکاران [۴۵] در سال ۲۰۱۳ برای اطمینان از ایجاد اتمیزاسیون مناسب در شرایط عملیاتی گسترده از میکروجت^۱ برای تزریق سریع گاز استفاده کردند از میکروجت فقط در شرایطی استفاده می‌شود که اتمیزاسیون به‌خوبی انجام نمی‌گیرد. مطالعات تجربی و عددی انجام‌شده، نشان داد که میکروجت می‌تواند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای اتمیزاسیون را تنها با ۱٪ نرخ جریان جرمی جت مایع (حالت بدون میکرو جت) بهبود بخشد. استفاده از میکروجت اندازه متوسط ساوتر قطرات را تا ۰/۱ کاهش می‌دهد. هر دو بررسی تجربی و عددی، اثرات میکروجت را تأیید کردند و مکانیزم افزایش اتمیزه شدن را نشان دادند. نتیجه‌گیری به‌صورت زیر خلاصه می‌شود:

(۱) مشخص شد که یک میکروجت سریع قادر به افزایش قابل‌توجه اتمیزه‌شدن با تنها ۱٪ از شدت جریان جرمی جت‌های مایع بود. قطر متوسط ساوتر با استفاده از تزریق میکروجت، یک دهم مقدار اصلی شد.

(۲) جریان با یک میکروجت تحت سلطه دو عدد بدون بعد است. (Re-We)

(۳) یک عدد بدون بعد، عدد وبر نسبی بین جت‌های مایع و میکروجت در نقطه برخورد بود. هنگامی

^۱Microjet

که عدد وبر نسبی بیش از ۴۰۰ باشد، قطرات ریز در اطراف صفحه جت مایع با تکه تکه شدن لیگامنت‌ها قرار می‌گیرند.

(۴) یک عدد بدون بعد غالب دیگر، نسبت فشار دینامیکی (میکروجت / جت مایع) در نقطه برخورد بود. هنگامی که نسبت فشار دینامیکی بزرگ‌تر از تقریباً ۱ باشد، اتمیزاسیون برخورد به شدت افزایش می‌یابد.

شکل ۲-۲ نتایج تجسم پاشش را در $We_L=500$ نشان می‌دهد. در $\phi = 0\%$ ، بدون میکروجت، اتمیزاسیون از طریق برخورد جت^۱ تشکیل فیلم مایع^۲ کشیدگی^۳ و فروپاشی لیگامنت^۴ اتفاق می‌افتد. در $\phi = 5\%$ صفحه جت مایع تغییر شکل بیش‌تری می‌دهد و طول صفحه جت کوتاه‌تر از مورد $\phi = 0\%$ است. میدان جریان با تغییر شدید افزایش سرعت جریان میکروجت به بیش از $\phi = 10\%$ می‌رسد و صفحه جت مایع در اثر برخورد جت دیگر قابل شناسایی نیست. در اطراف نقطه برخورد، قطرات بلافاصله تولید می‌شوند و اتمیزاسیون به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. در $\phi = 15\%$ ، اتمیزاسیون ثانویه^۵ نیز در منطقه پایین دست افزایش یافته است. در شرایط $\phi \geq 10\%$ ، فراوانی قطرات ریز به سرعت افزایش می‌یابد و واریانس اندازه قطره باریک می‌شود. در نتیجه ثابت شده است که تزریق در حدود $\phi = 10\%$ به طور قابل توجهی باعث بهبود اتمیزاسیون جت‌های برخوردی می‌شود. انتظار می‌رود که قطرات ریز بیش‌تری را می‌توان با استفاده از قطر کوچک‌تر انژکتور مایع تولید کرد.

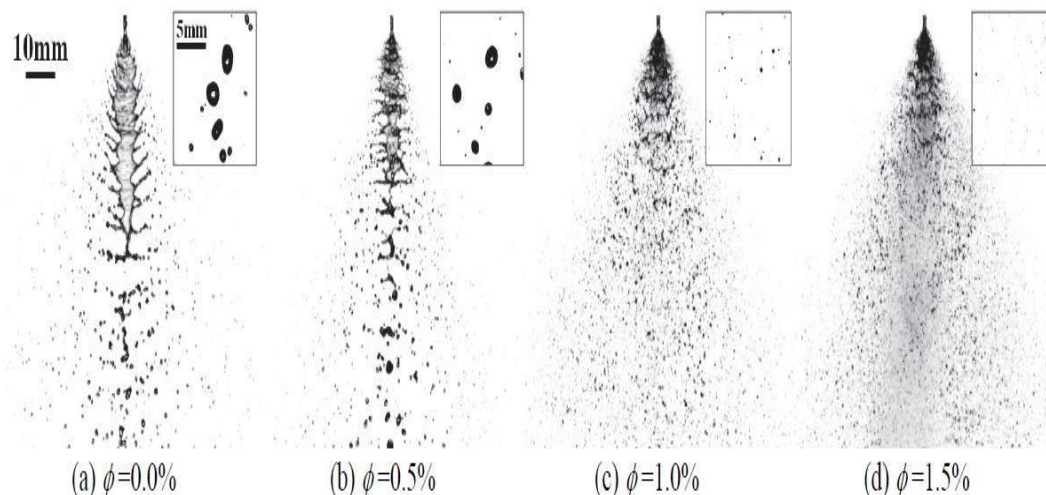
^۱Jet collision

^۲Liquid film formation

^۳Elongation

^۴Break of ligaments

^۵Secondary atomization



شکل ۲-۲- اثر تزریق میکروجت بر روی اتمیزاسیون در $We_L = 500$ [۴۵]

آوولپاتی و راویکرشنا [۴۶] در سال ۲۰۱۵ اتمیزاسیون بیوسوخت‌های با ویسکوزیته بالا را به کمک هوا در دو حالت پاشش پیوسته و گذرا مطالعه کردند. آن‌ها از دو جت مایع و یک جت هوا برای بررسی پاشش در حالت پیوسته و از یک انژکتور برخوردی برای بررسی پاشش گذرا استفاده کردند. در حالت پیوسته، ساختار پاشش را در نسبت‌های هوا به مایع مختلف از جمله حالت بدون جت هوا بررسی کردند. اثر نرخ جریان مایع و همچنین نسبت هوا به مایع بر زاویه مخروط پاشش و اندازه قطرات مایع نیز مطالعه شد. پاشش گذرا را در اختلاف فشارهای مختلف بین فشار هوا و فشار محفظه و اثر آن را بر ساختار پاشش، طول نفوذ و اندازه قطرات را بررسی کردند و در نهایت حداقل اختلاف فشار در حدود ۰/۵ مگاپاسکال برای اتمیزاسیون کامل سوخت مایع را گزارش کردند.

ژیا و همکاران [۴۷] در سال ۲۰۱۷ اتمیزاسیون با دو انژکتور مایع و یک انژکتور هوا را بررسی کردند. در این سیستم، اتمیزاسیون در دو مرحله صورت می‌گیرد؛ فروپاشی اصلی یا اولیه در اثر کشش سطحی و فروپاشی ثانویه که در آن صفحه‌های کوچک و قطرات بزرگ مایع در اثر نیروهای ویسکوز ایجاد شده بودند،

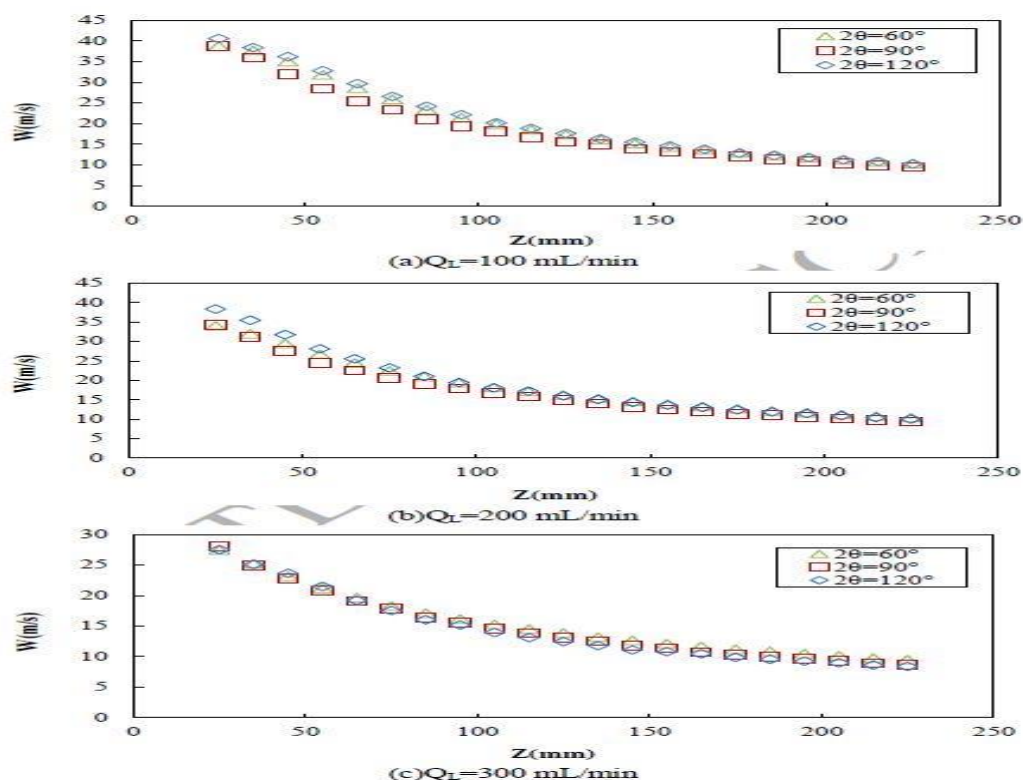
^۱Gas to Liquid Ratio (GLR)

توسط پاشش هوا به انبوهی از قطرات کوچک فروپاشی می‌شوند. آن‌ها اثر شدت جریان جرمی هوا بر ساختار پاشش را بررسی کردند. در حالتی که جریان هوا وجود نداشته باشد، صفحه‌های آب عمود بر صفحه حاوی محور دو انژکتور آب ایجاد می‌شود. اما در حالتی که جریان هوا ایجاد گردد، جریان هوا مانع تشکیل صفحه‌های آب می‌گردد. به‌منظور بررسی اثر شدت جریان هوا و آب بر ساختار پاشش، شدت جریان‌های متفاوت هوا و آب بررسی شد. همچنین آن‌ها در دو شدت جریان هوا و دو زاویه بین انژکتور، زاویه مخروط پاشش را بررسی کردند. آزمایش‌های انجام‌شده، افزایش زاویه مخروط پاشش با افزایش شدت جریان هوا و آب و همچنین وابستگی شدید زاویه مخروط پاشش به زاویه بین انژکتور را مشخص نمودند. آن‌ها توزیع شعاعی قطر متوسط ساوتر در فواصل مختلف از نقطه برخورد را بررسی کردند. نتایج ناحیه مرکزی با مقادیر کوچک ۵۵ تا ۸۰ میکرون را نشان دادند و افزایش قطر قطرات با دور شدن از مرکز مشاهده شد. آن‌ها همچنین اثر شدت جریان آب بر اندازه قطرات را بررسی کردند.

پارامترهایی مانند نسبت گاز به مایع، عدد وبر و نسبت اندازه تکانه هوا به مایع برای مدل در نظر گرفته شد که تغییرات قطر متوسط ساوتر بدون بعد را نشان داد. این موارد همچنین مطابق با اعداد وبر پایین تعریف‌شده در معادله (۲-۱) هستند و نسبت اندازه حرکت هوا به مایع در معادله (۲-۲) زیر تعریف‌شده است.

$$We = \frac{d \rho_g (U_g - U_l)^2}{\sigma} \quad (1-2)$$

$$ALMR = \frac{U_g \dot{m}_g}{U_l \dot{m}_l} \quad (2-2)$$

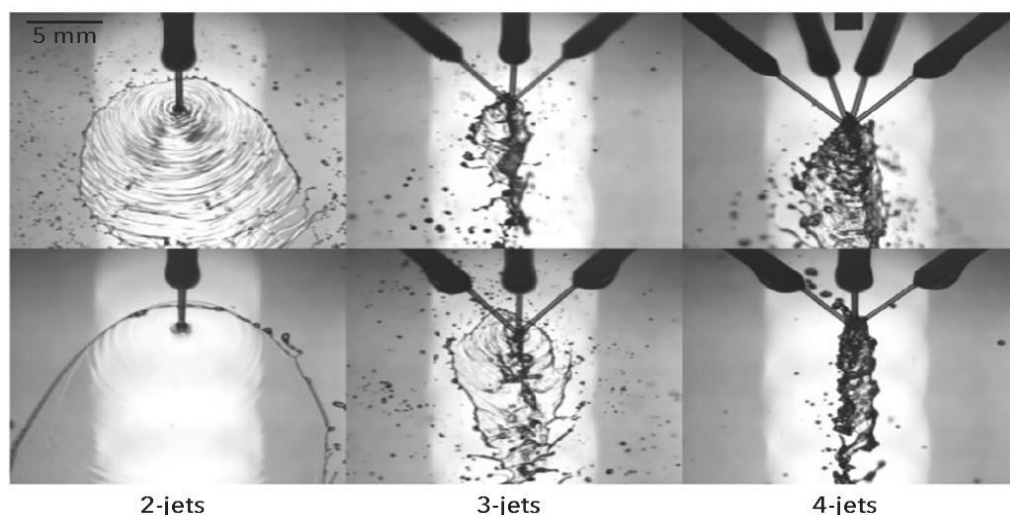


شکل ۲-۳- توزیع سرعت قطره محوری متوسط در امتداد محور پاشش در ۲۷ گرم بر دقیقه [۴۷]

کاهش سرعت محوری متوسط خط مرکزی قطرات واقع در امتداد راستای محور W پاشش در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. در نرخ جریان جرمی هوای ثابت ۲۷ گرم بر دقیقه، زاویه برخورد تأثیر کمی بر سرعت متوسط قطرات دارد. نفوذ تکانه پاشش به میزان کمی تحت تأثیر زوایای پاشش قرار می گیرد. شکل ۲-۳ نشان می دهد که با افزایش فاصله از خروجی انژکتور، سرعت کاهش می یابد که ناشی از انبساط جت هوا و افزایش مقاومت هوا است.

پیزیول و همکاران [۴۸] در سال ۲۰۱۸ برای این کار یک طراحی تزریق کننده جدید بر اساس پاشش های تولید شده از تأثیر همزمان جت های چندگانه با استفاده از یک جت هوای اضافی برای کمک به فرآیند اتمیزه شدن را پیشنهاد کردند. در نهایت، آزمایش های آن ها نشان می دهد که مخلوط کردن یک سوخت زیستی با یک سوخت فسیلی به طور قابل توجهی ویژگی های پاشش را تغییر نمی دهد که به عنوان یک گام بالاتر در توسعه جایگزینی بیش تر سوخت های زیست محیطی برای موتورهای هواپیما در نظر

گرفته می‌شود. آن‌ها اثر نرخ جریان جرمی هوا بر قطر متوسط ساوتر را در سه حالت ۲، ۳ و ۴ جت مایع و دو نوع سوخت مایع بررسی کردند. بسته به نرخ جریان جرمی هوا، گذار بین اتمیزه شدن توسط فروپاشی هیدرودینامیکی صفحه جت مایع تشکیل شده روی نقطه برخورد، همان‌طور که در اتمیزه کردن جت‌های مایل تحت شرایط جریان عرضی یافت می‌شود، در یک مکانیزم فروپاشی آیرودینامیکی، وجود دارد؛ در نهایت، علی‌رغم استفاده از پیکربندی‌های مختلف (۲، ۳ و ۴ - جت‌های برخوردی)، نتیجه مشابه شرایط اندازه قطرات تولید شده است، اگرچه افزایش تعداد جت‌های برخوردی نیز نشان‌دهنده بهتر شدن کارایی اتمیزه شدن است.



شکل ۲-۴- الگوی پاشش در تعداد متفاوت جت مایع [۴۸]

ژیا و همکاران [۴۹] در سال ۲۰۱۸ رفتار یک سیستم اتمیزاسیون با دو جت مایع افقی برخوردکننده را در دو حالت با و بدون جت هوای عمودی، به صورت تجربی مطالعه کردند. آن‌ها اثر جت عمودی هوا بر مشخصات جریان مانند قطر صفحه مایع، اندازه قطرات و سرعت متوسط را بررسی کردند. اطلاعات کمی از اندازه‌گیری‌ها، اندازه قطرات، سرعت متوسط و جذر متوسط مربعات نوسانات سرعت در ادامه ارائه شد. صفحه‌های صاف و شفاف با لبه‌های ضخیم‌تر و صفحه‌های آشفته و غیر شفاف با لبه‌های باریک‌تر را به ترتیب در نرخ جریان ۱۰۰-۱۲۵ میلی‌متر بر دقیقه و نرخ جریان بزرگ‌تر از ۱۵۰ میلی‌متر بر دقیقه، گزارش کردند.

نتایج نشان دادند که قطر متوسط صفحه مایع در دو فاصله مختلف بین دو جت مایع با افزایش عدد رینولدز به صورت خطی افزایش می یابد. آن ها همچنین اثر عدد وبر بر صفحه، مایع را بررسی کردند. اندازه قطرات مایع را با استفاده از سطح اشغال شده هر قطره در تصاویر تهیه شده اندازه گرفتند. اندازه ۳۰۰ نمونه را با استفاده از حدود ۱۰۰۰ تصویر متوالی برآورد کردند. بنا بر نتایج به دست آمده برای ایجاد قطرات با اندازه متوسط ۱۰۰ میکرون عدد وبر ۶۰۰۰ لازم است. آن ها با بررسی اثر نرخ جریان آب نتیجه گرفتند که افزایش نرخ جریان آب منجر به کاهش اتمیزاسیون در بخش مرکزی می شود. اثر نرخ جریان جرمی هوا نیز بررسی شد، حذف صفحه مایع، پیوندهای بزرگ و به دنبال آن قطرات کوچک و اتمیزاسیون بهتر و کاهش قطر متوسط ساوتر از جمله اثرات افزایش شدت جریان جرمی هوا هستند.

۲-۲- اتمیزاسیون با یک جت مایع به کمک هوا

اتمیزاسیون حاصل از برخورد جت هوا و آبی آزاد توسط پولیکوکاس [۵۰] در سال ۱۹۵۸ مورد، بررسی قرار گرفت. نتایج او نشان داد که در زاویه های برخورد کوچک، سایز قطرات نسبت به زاویه ای بزرگ تر به صورت قابل توجهی بیشتر می باشند که علت آن فروپاشی لیگامنت های مایع به قطرات با اندازه های بزرگ تر است. در شکل ۲-۵ دوربین پرسرعت در فاصله های مختلف در پایین دست^۲ جریان انژکتور قرار داده شد. شکل ۲-۵ نشان دهنده پدیده فروپاشی مایعی می باشد که در فواصل ۳، ۱، ۵ و ۸ اینچ پایین دست جریان نقطه برخورد^۳ در نظر گرفته شده است. در فاصله ۱ اینچ، صفحه مایع شکل گرفته همراه با امواج^۴ که تاج^۵ آن ها شروع به فروپاشی و تشکیل لیگامنت ها در عرض ۳ اینچ می کنند. در فاصله

^۱Ligaments

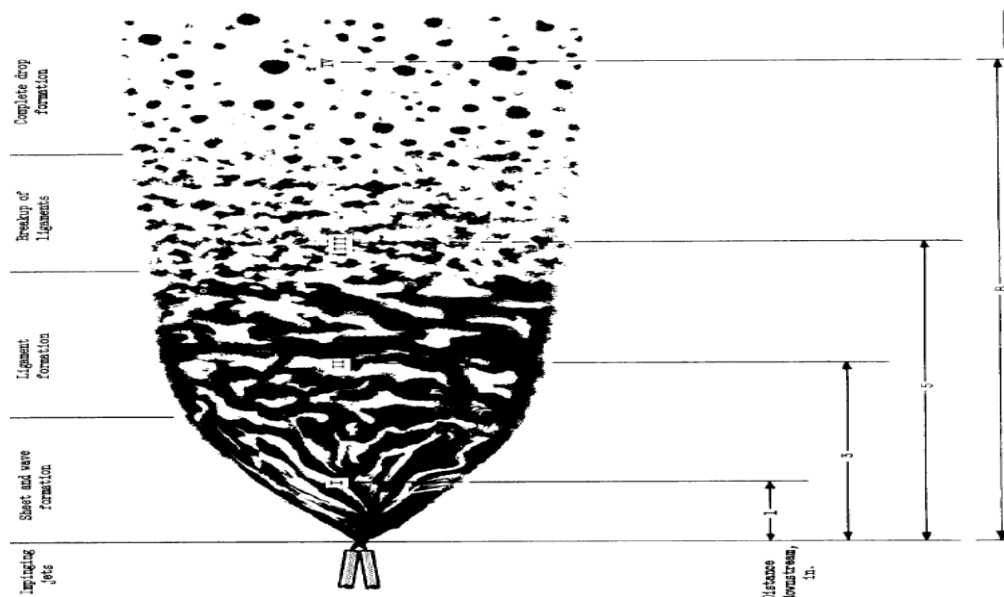
^۲Downstream

^۳Impinging point

^۴Waves

^۵Crests

۵ اینچ، لیگامنت‌ها هنوز در حال فروپاشی هستند و قطره‌ها نیز در حال تشکیل می‌باشند. سرانجام، در ۸ اینچ روند تشکیل قطره به‌طور کامل ادامه یافت.



شکل ۲-۵- نمایش اتمیزاسیون با استفاده از جت‌های برخوردی [۵۰]

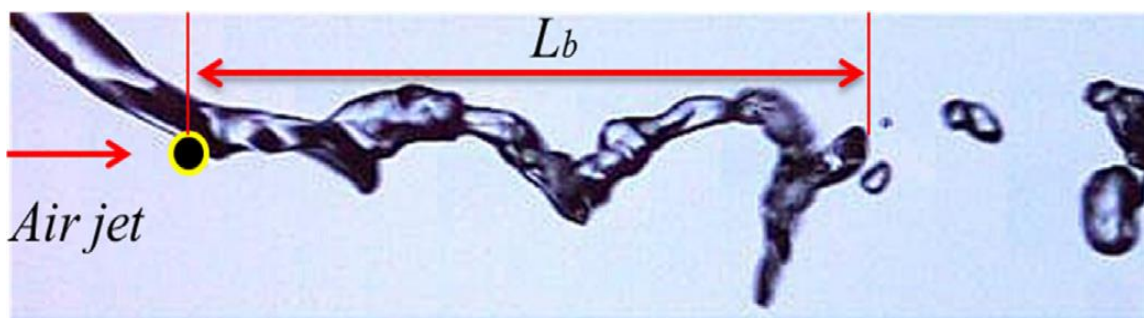
ژیا و همکاران [۵۱] در سال ۲۰۱۸ با استفاده از دستگاه دوپلر فازی^۱ اندازه پارامترهایی را از جمله قطر متوسط قطرات، شار حجمی مایع، طول فروپاشی، زاویه پاشش و سرعت متوسط قطرات را بررسی کردند. انژکتور هوا به‌صورت عمودی به انژکتور آب مایل برخورد می‌کند. پاشش حاصل از این نوع انژکتور برخوردکننده آب با هوا به‌صورت متقارن محوری نیست.

در سه زاویه برخورد بین انژکتور هوا و آب ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، آزمایش‌ها انجام شدند. قطرات کوچک‌تر در نزدیکی مرکز پاشش قرار گرفتند، اما موقعیت آن‌ها برای شرایط تجربی مختلف با حداقل مقدار متوسط قطر ساوتر برابر ۵۰ میکرون افزایش تا حدود ۱۲۰ میکرون در ناحیه بیرونی پاشش برای شرایط ۱۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، ۱۳/۵ گرم بر دقیقه و زاویه ۴۵ درجه، تغییر می‌کند. بالاترین سرعت متوسط قطره در موقعیت پایین‌دست خروجی جت هوا است (۱۴ متر بر ثانیه در صفحه $Z = 75$ میلی‌متر در پاشش

^۱Phase Doppler Anemometry

با، ۱۳/۵ گرم بر دقیقه و زاویه برخورد ۴۵ درجه) و به تدریج با افزایش فاصله از نقطه‌ای که در آن قطرات با سرعت حداکثر واقع شده‌اند، کاهش می‌یابد.

طول فروپاشی جت مایع برای توسعه مدل‌های محاسباتی که تلاش می‌کنند رفتار پاشش را پیش‌بینی کنند با توجه با این واقعیت که درگ آیرودینامیکی برای جت مایع و قطرات متفاوت است، مهم می‌باشد. طول فروپاشی، همان‌طور که در شکل ۶-۲ نشان داده شده‌است، به صورت فاصله از نقطه برخورد هندسی تا موقعیتی تعریف می‌شود که در آن ستون آب ناپیوسته می‌شود.



شکل ۶-۲- طول فروپاشی مایع [۵۱]

فصل ۳: ستاپ آزمایش

۳-۱- مقدمه

در تحقیق حاضر برای اندازه‌گیری پارامترهای موردبررسی، نیاز به طراحی و ساخت ستاپ برای ثبت داده‌های اولیه است. همچنین ضروری است برای استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی موردنیاز در طول آزمایش، نحوه استفاده از این تجهیزات به‌طور کامل یاد گرفته شود. در این مطالعه برای گرفتن تصاویر برخورد دو جت هوا و آب از دوربین پرسرعت استفاده می‌شود؛ درنهایت برای تحلیل داده‌ها از روش پردازش تصویر استفاده خواهد شد. در ابتدای فصل نیز، به چیدمان تجهیزات آزمایشگاهی و ستاپ^۱ مورد استفاده در مطالعه حاضر پرداخته می‌شود.

۳-۲- طراحی و ساخت ستاپ آزمایش

برای انجام تست‌های مربوط به بررسی مشخصات و رفتار پاشش تشکیل‌شده بر اثر برخورد دو جت هوا و آب به یکدیگر نیاز بود تا ستاپی تهیه شود. ستاپ طراحی‌شده از سه‌بخش مختلف تشکیل‌شده است. قسمت اول مربوط به سیستم تأمین سیال هوا و آب می‌باشد. ویژگی‌های مربوط به سیستم تأمین سیال به شرح زیر است:

(۱) قابلیت اندازه‌گیری فشار و شدت جریان برای هر دو جت هوا و آب.

(۲) قابلیت کنترل شدت جریان جریان برای تنظیم سرعت جت‌های هوا و آب.

(۳) قابلیت تأمین سیال با لزجت‌های مختلف.

در قسمت دوم ستاپ آزمایش، برای تولید جت‌ها به انژکتورهای خاصی نیاز است. قطر سوراخ انژکتورها

۱ میلی‌متر با توجه به کاربرد انژکتورهای برخوردی است.

^۱Setup

^۲Orifice

انژکتورهای موردنظر باید دارای ویژگی‌های زیر باشد:

- (۱) بالا بودن میزان نسبت طول به قطر انژکتور برای توسعه یافتگی کامل جریان جت در خروجی انژکتور
- (۲) صافی سطح داخل انژکتور برای جلوگیری از اغتشاش جریان در رینولدزهای پایین.
- (۳) قابلیت ساخت با تشابه بسیار بالا با توجه به استفاده از دو جت مختلف با قطر یکسان برای تولید پاشش تشکیل شده.

ویژگی‌های مربوط به سیستم سازه نگهدارنده انژکتورها به شرح زیر می‌باشد:

- (۱) قابلیت تنظیم هم‌راستای^۲ دو جت با توجه به نیاز برخورد هم‌راستایی دو جت.
- (۲) انژکتورها توسط یک سازه نگهدارنده با دو فک و سه درجه آزادی نگهداری می‌شوند تا به توان موقعیت برخورد در فواصل مختلف و همچنین زاویه بین دو انژکتور را به صورت دلخواه تغییر داد.
- (۳) قابلیت تنظیم زاویه برخورد دو جت با یکدیگر با توجه به اثرگذار بودن پارامتر زاویه برخورد در الگو و رفتار پاشش تشکیل شده.

۳-۳- سیستم تأمین سیال

آزمایش‌ها در دمای اتاق محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار اتمسفر انجام شد. عکاسی با سرعت بالا توسط دوربین پرسرعت به ترتیب برای نمایش پاشش و اندازه‌گیری سرعت قطره، هم‌زمان استفاده می‌شوند. طرح کلی تجهیزات تست در شکل ۱-۳ نشان داده شده است که اجزای اصلی آن شامل انژکتور جت‌های برخوردی آب - هوا، دوربین سرعت بالا و سیستم‌های تأمین جریان سیال هستند. جت هوا عمودی است و روی یک جت آب مایل قرار می‌گیرد. جریان هوا و آب به طور مستقل تأمین و کنترل شدند. شکل ۱-۳ سیستم

^۱Stand

^۲Centricity

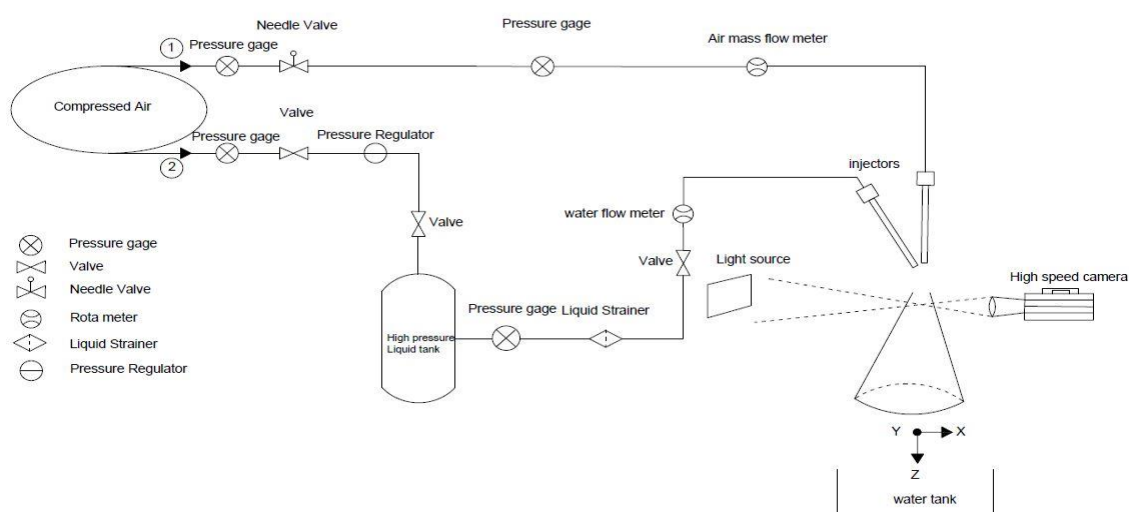
تأمین سیال به انژکتورها جت‌های هوا و آب را نشان می‌دهد. جهت انجام این آزمایش از یک استخر طراحی شده به طول ۵۰ سانتی‌متر، عرض ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر استفاده می‌شود. برای اطمینان از تحمل مخزن در صورت پر شدن آب در آن، از شیشه شفاف با ضخامت ۱ سانتی‌متر ساخته شده تا امکان بررسی پدیده پاشش فراهم شود. در طول مسیر حرکت آب در مسیر مخزن آب و انژکتور، از شلنگ‌های پنوماتیک استفاده شده است. همچنین تمامی اتصالات پنوماتیکی استفاده شده به صورت آب‌بند هست تا آب در مسیر حرکت از دست نرود. در این تست از دو انژکتور که یکی ساکن (هوا) و دیگری متحرک (آب) در راستای عمودی با قطر ۱ میلی‌متر جهت ایجاد پدیده پاشش استفاده می‌شود و سرعت‌های مختلف با تغییر شدت جریان سیال هوا و آب به داخل این انژکتورها حاصل می‌شوند.

این سیستم از یک مخزن سیال تشکیل شده است که سیال آب در آن ریخته می‌شود. این مخزن طراحی شده از سه قسمت اصلی تشکیل شده است. قسمت اول، شیر خروج سیال از این مخزن را کنترل می‌کند. قسمت دوم مخزن سیال، قسمت ورودی هوا است. قسمت سوم مخزن، یک شیر اطمینان برای شرایط اضطراری برای تخلیه فشار داخل مخزن است. این سیستم شامل یک کمپرسور هوای هیوندای ۱/۵ اسب بخار هست. هوای کمپرسور در یک مخزن ذخیره هوا که برای هوا در فشار تا حدود ۸ اتمسفر طراحی شده است، ذخیره می‌شود. از مخزن ذخیره هوا دو خط هوا برداشته می‌شود که یکی از آن‌ها به مخزن ذخیره آب با ظرفیت حدود ۱۰ لیتر و دیگری به انژکتورهای برخوردی متصل می‌شود. سپس خط هوا با یک شیر و یک فشارسنج به تزریق کننده هوا متصل می‌شود. مخزن کمپرسور به همراه نشانگر فشار و رگلاتور، فشار آن را نشان می‌دهد. همچنین رگلاتور متصل شده به آن دارای دو نشانگر و یک شیر است. نشانگر اول فشار داخل مخزن کمپرسور را و نشان‌دهنده دوم فشار داخل مخزن پرفشار را که توسط شیر رگلاتور تنظیم و تثبیت می‌شود، را نشان می‌دهد. این کمپرسور دارای دو خروجی مختلف می‌باشد. خروجی اول کمپرسور برای تأمین هوای مورد نیاز انژکتور هوا و از خروجی دوم برای افزایش فشار مخزن آب استفاده گردید. برای تنظیم فشار ورودی در مسیر هوا، یک عدد گیج فشار بر خروجی اول کمپرسور قرار دارد؛ پس

از هر شیر از یک روماتر برای اندازه‌گیری شدت جریان سیال و به‌دست آوردن سرعت جت‌ها استفاده شده است. در حین آزمایش مخزن کمپرسور هوا به مخزن پرفشار متصل است و رگلاتور فشار سیال را با توجه به کاسته‌شدن آن حین آزمایش، ثابت نگه می‌دارد که به معنی این است که سیال آب خارج‌شده با هوای پرفشار جایگزین می‌شود که این عمل امکان تزریق کامل سیال به انژکتورها با فشار مورد، نظر را به‌وجود می‌آورد. بعد از خروجی مخزن آب، شیر فیلتردار قرارداده شده است که از ورود ناخالصی به انژکتور آب جلوگیری کند. در ادامه، تصویر شماتیک ۲-۳ هریک از اجزای سیستم سیال‌رسانی نشان داده شده است.



شکل ۳-۱- سیستم سیال‌رسانی به جت‌ها و نحوه‌ی جایگیری منبع نوری و دوربین سرعت بالا



شکل ۳-۲- شماتیک سیستم سیال رسانی به جت‌ها و نحوه‌ی جایگیری منبع نوری و دوربین سرعت بالا

۳-۴-تجهیزات

در این قسمت از تجهیزات مختلفی استفاده شده که در این بخش به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود و نحوه عملکرد و دلیل استفاده از آن‌ها تشریح خواهد شد.

۳-۴-۱-دوربین پرسرعت

مبنای تمام تست‌های گرفته شده، تصویربرداری از رفتار و مشخصات پاشش بر اثر برخورد دو جت هوا و آب و سپس پردازش تصاویر هست. این نوع از دوربین‌ها کاربردهای فراوانی در زمینه‌های علمی، صنعتی و هوا فضا دارند. از یک دوربین پرسرعت (PCO. Dimax S1) استفاده شده است که در بالاترین سرعت، توانایی ثبت ۴۵۰۰ عکس در هر ثانیه را دارا می‌باشد. تصاویر با دوربین سرعت بالا از دو جهت (نمای جلویی^۱ و نمای کناری^۲) گرفته شد و با استفاده از نرم‌افزار CamWare V. 3. 17 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. ساختار پاشش^۳ و نحوه تعامل جت آب و جت هوا با یکدیگر از توالی‌های زمانی لحظه‌ای مشاهده شدند. سرعت فریم نمونه و سرعت شاتر به ترتیب ۴۰۰۰ فریم بر ثانیه و ۱ / ۴۰۰۰ ثانیه، تنظیم شدند.

رزولوشن^۴ دوربین از ۱۶×۲۴۰، ۸×۱۰۰۸ تا ۸×۱۰۰۸ قابل تغییر است که به دلیل محدودیت حافظه دوربین، به طور طبیعی رزولوشن کم می‌شود. به علت افزایش سرعت ذخیره کردن تصاویر، نیاز به نورپردازی بیش‌تری وجود دارد. محدوده زمان نوردهی این دوربین از ۱/۵ میکروثانیه تا ۴۰ میلی ثانیه است. در این بررسی برای ثبت و ذخیره سازی عکس‌ها و فیلم‌ها به ترتیب فرمت JPEG و AVI استفاده شده است. این دوربین برای ذخیره سازی تصاویر گرفته شده به حافظه داخلی ۳۶ گیگابایت مجهز می‌باشد و رابط‌های آن شامل USB ۳/۰، HD-SID، GigaE/USB 2/0 و CameraLink می‌باشد. دوربین در شکل ۳-۳ نمایش داده شده است.

^۱High speed camera

^۲Front view

^۳Side view

^۴Spray structure

^۵Resolution



شکل ۳-۳- دوربین پرسرعت مدل PCO-Dimax S1

به همراه دوربین از یک لنز Nikon مدل AF-S Micro-Nikkor ۸.۲mm f/۱.۵ IF-ED همراه دوربین از یک لنز Nikon مدل AF-S Micro-Nikkor ۸.۲mm f/۱.۵ IF-ED استفاده شده است. طول و قطر لنز به ترتیب ۱۱۶ و ۸۳ میلی متر و فاصله کانونی ۱۰۵ میلی متر است که بیشینه نسبت کانونی و کمینه نسبت کانونی آن به ترتیب $f:2/8$ و $f:32$ است. این لنز دارای قابلیت فوکوس خودکار است. حداقل فاصله فوکوس ۳۱ سانتی متر و وزن این لنز ۷۲۰ گرم است. همچنین قابلیت لرزش گیر درون لنز تعبیه شده است. این لنز ماکرو مخصوص عکاسی و فیلم برداری از نزدیک^۱ (تا بزرگنمایی ۱: ۱) و پرتره^۲ می باشد. این لنز این توانایی را دارد که هنگام نزدیک شدن به پدیده مورد نظر، تصویری شفاف از آن را در اختیار گذارد. شکل ۳-۴ لنز مورد استفاده شده را نشان می دهد.



شکل ۳-۴- لنز مورد استفاده ۱۰۵ میلی متر ساخت نیکون

^۱Close up

^۲Portrait

۳-۴-۲- منبع نوری

یکی از موارد موردنیاز در هنگام استفاده از دوربین، نورپردازی است. برای عکسبرداری از دو پروژکتور ۲۰۰۰ وات از شرکت UNIMAT استفاده شده است که در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. هریک از این پروژکتورها قابلیت تأمین ۲۰۰۰ وات انرژی را دارند. هر پروژکتور مورد استفاده از دو عدد اسرام ۱۰۰۰ وات تشکیل شده است. قاب های بالایی و پایینی برای تمرکز نور رو پدیده استفاده شده است. نحوه نورپردازی، بدین صورت است که هر پروژکتور به یک مقوای نسبتاً ضخیم مشکی رنگ که در پشت پدیده است، تابیده می شوند.



شکل ۳-۵- پروژکتور ۲۰۰۰ وات شرکت UNIMAT

۳-۴-۳- انژکتور

همان طور که پیش تر ذکر شد برای توسعه یافتگی کامل جریان لازم است تا بی گمان نسبت طول به قطر انژکتور عدد بزرگی باشد. از آنجایی که نسبت طول به قطر انژکتور در جریان خروجی آن بسیار تأثیر گذار است با بررسی و مطالعات انجام شده، طول و ابعاد انژکتور به دقت انتخاب شده است به گونه ای که که جریان آن کاملاً توسعه یافته باشد. از طرفی، با توجه به کاربرد این نوع انژکتور لازم است تا سطح مقطع خروجی انژکتور که خود از نوع اوریفیسی ساده است، قطری بین ۰/۱ تا ۱ میلی متر داشته باشد.

رابطه (۱-۳) معیار جریان آرام برای توسعه یافتگی را به صورت زیر ارائه داده است.

$$\frac{L}{D} = 0.5 Re \quad (1-3)$$

هم چنین، در جریان آشفته رابطه (۳-۲) برای توسعه یافتگی کامل جریان ارائه شده است.

$$\frac{L}{D} = \frac{1}{4} (Re)^{\frac{1}{4}} \quad (3-2)$$

با توجه به بزرگتر بودن نسبت طول به قطر جریان آرام برای بیشینه رینولدز جریان آرام، حداقل نسبت طول به قطر مورد نظر برای توسعه یافته شدن جریان برابر ۱۱۵ هست برای انجام آزمایش‌ها با توجه به آشفته بودن جریان از سوزن تزریقات دامی استفاده شده است. استفاده از سوزن تزریقات دامی هم چنین این امکان را به ما می‌دهد تا هر دو انژکتور مورد استفاده‌ی ما کاملاً مشابه و یکسان باشند. در این پژوهش، انژکتورهای سوزنی فلزی با قطر داخلی ۱ میلی‌متر استفاده شده است. طول لوله انژکتور ۱۵۰ میلی‌متر است تا جت برخوردی حاصل شده، به علاوه نسبت بالای طول به قطر یک جت کاملاً توسعه یافته باشد؛ به علاوه اینکه ساخت انژکتور اوریفیسی ساده با این نسبت طول به قطر و این مقدار بازه‌ی قطر با دقت بالا و ساخت مشابه آن ممکن نیست. هم چنین محفظه‌ی فلزی طراحی شده در پشت سوزن قرار داده شده است تا تلاطم جریان آشفته پشت و قبل از ورود به سوزن از بین برود. انژکتورهای جت‌های برخوردی هوا و آب نیز از دو لوله استیل ضدزنگ ساخته شده است که قطر خروجی لوله استوانه‌ای هوا و آب ۱ میلی‌متر است. طول لوله‌های هوا و آب ۱۵۰ میلی‌متر است؛ بنابراین نسبت‌های طول به قطر L/D برای جت هوا و آب به ۱۵۰ است که شرایط کاملاً توسعه یافته در خروجی انژکتورهای هوا و آب را تضمین می‌کند. برای ثابت بودن لوله استوانه در هنگام تست و همین‌طور برای جلوگیری آسیب دیدن احتمالی، دیواره فلزی ضخیمی برای آن طراحی شد.



شکل ۳-۶- انژکتور ساخته شده برای دو جت هوا و آب

۳-۴-۴- پایه ستاپ انژکتور

همان‌طور که پیش از این ذکر شد برای قرارگیری انژکتورها، تنظیم زاویه و مکان برخورد دو جت و همچنین هم‌راستا کردن آن‌ها و اعمال و اندازه‌گیری ناهم‌راستایی روی برخورد دو جت نیاز به یک پایه خاص، با توجه به مشخصات انژکتور است. در شکل ۳-۷ این پایه نشان داده شده است. انژکتورها توسط یک سازه نگه‌دارنده با دو فک و سه درجه آزادی نگهداری می‌شوند تا به توان موقعیت برخورد در فواصل مختلف و همچنین زاویه بین دو انژکتور را به صورت دلخواه تغییر داد. جت هوا عمودی است و روی یک جت آب مایل قرار می‌گیرد. همچنین برای تنظیم زاویه برخورد دو جت به یکدیگر از دو استیج گردان استفاده شده است. زاویه برخورد بین جت هوا و آب با استفاده از قاب‌های با زوایای ثابت شامل ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، تغییر می‌کند. فاصله بین خروجی انژکتور و نقطه برخورد هندسی برای هر دو انژکتور هوا و آب ۱۰ میلی‌متر است.



شکل ۳-۷- پایه ستاپ انژکتور

۳-۴-۵- روتامتر

نحوه عملکرد در این شدت جریان سنج‌ها به این صورت است که جریان سیال به صورت قائم، از پایین به بالا از درون یک لوله شیشه‌ای مخروطی عبور داده می‌شود. در داخل این مخروط یک شناور قرار دارد که نحوه عملکرد در این شدت جریان سنج‌ها به این صورت است که جریان سیال به صورت قائم، از پایین به بالا از درون یک لوله شیشه‌ای مخروطی عبور داده می‌شود. داخل این مخروط یک شناور قرار دارد که جرم حجمی آن از جرم حجمی سیال بیش‌تر است. افزایش شدت جریان سیال باعث حرکت شناور به سمت بالا می‌شود؛ بنابراین موقعیت شناور معیاری از مقدار شدت جریان سیال خواهد بود. محفظه روتامتر را می‌توان از شیشه یا فلز ساخت. در مواردی که سیال مورد، اندازه‌گیری قابل‌اشتعال یا خطرناک باشد از محفظه فلزی استفاده می‌شود در این حالت، شناور دیگر قابل رؤیت نیست. به دلیل استفاده از لوله شیشه‌ای در روتامتر^۱ مدل ACA 02، می‌توان از آن برای اندازه‌گیری شدت جریان گازها و مایعات خورنده استفاده کرد؛ از جمله موارد کاربرد این نوع روتامتر می‌توان به صنایع نفت، گاز، پتروشیمی، آزمایشگاه‌های صنعتی و تحقیقاتی اشاره کرد. مقدار خطا در این روتامترها حدود ۰.۵٪ است. شدت جریان آب و هوا توسط این روتامترها اندازه‌گیری شدند. این روتامتر بر اساس فشار کاری تا ۷ بار طراحی و ساخته شدند. به علت مشخص بودن شدت جریان هر دو سیال، می‌توان سرعت خروجی هریک از انژکتورها را مشخص نمود. در انتهای روتامتر، با توجه به از استفاده از تبدیل‌های پنوماتیکی، از سائز شماره ۸ پتوماتیک استفاده شد.

روتامترهای مربوط به هوا و آب در شکل ۳-۸ نمایش داده شده‌اند. هم‌چنین، مشخصات آن‌ها نیز در جدول ۳-۱ آمده است.

^۱Rotameter



(ب)

(الف)

شکل ۳-۸- روتامتر ساخته شده برای اندازه گیری نرخ شدت جریان (الف): آب- (ب): هوا

جدول ۳-۱- مشخصات روتامتر هوا و آب

مدل	رنج شدت جریان	سیال	دمای	فشار	اتصالات
ACA02-10	۶۰-۶۰۰ ml/min	آب	۲۰ درجه	۷ بار	پنوماتیک سایز ۸
ACA02-10	۴-۴۰ g/min	هوا	۲۰ درجه	۷ بار	پنوماتیک سایز ۸

۳-۴-۶ کمپرسور هوا

کمپرسور هوا هیوندای AC-1550 یکی از مدل های جالب و کارآمد است که از قابلیت "کم صدا" بهره می برد. مخزن کمپرسور ۵۰ لیتری هیوندای AC-1550 در حداقل زمان (۳ الی ۴ دقیقه) پر می شود. قدرت موتور این ابزار بادی معرفی شده ۱/۵ اسب بخار است. ظرفیت هوادهی کمپرسور سایلنت ۵۰ لیتری هیوندای ۱۵۵۰، معادل ۲۱۶ لیتر در دقیقه است. نهایت قدرت کمپرسور هوا سایلنت ۱۱۰۰ وات است که

به راحتی می تواند دو دستگاه را به صورت همزمان پشتیبانی کند. دو خروجی کوپلر و فشارسنج نیز به همین منظور در نظر گرفته شده است. این کمپرسور در شکل ۳-۹ نشان داده شده است. برای تهیه جریان هوای مناسب از یک کمپرسور با ظرفیت ۵۰ لیتر هوای فشرده، استفاده شده است. از کمپرسور هوا برای تأمین و تنظیم فشار آب موجود در مخزن آب استفاده می شود که مستقیماً به همدیگر متصل می کنیم. به کمک رگولاتور نصب شده بر خروجی هوا، می توان فشار را به حد دلخواه رساند. در طول تست، کمپرسور هوا به مخزن آب متصل است تا در حین کاهش حجم آب، فشار داخل مخزن مرتباً کنترل شده و ثابت باقی بماند. هوای فشرده از سیستم کمپرسور متمرکز به انژکتور جت هوا انتقال داده می شود و شدت جریان هوا با استفاده از جریان سنج جرمی روتامتر مخصوص هوا اندازه گیری می شود. از دو خروجی این کمپرسور به نحو احسن استفاده شد؛ برای مثال از خروجی اول برای تهیه هوا خروجی انژکتور هوا و از خروجی دوم برای افزایش فشار مخزن آب استفاده گردید.



شکل ۳-۹- کمپرسور هوای ۱/۵ اسب بخار شرکت HYUNDAI

۳-۴-۷- مخزن پرفشار سیال

شکل ۳-۱۰ مخزن پرفشار مایع به همراه نشان دهنده فشار آن را نشان می دهد. همان طور که گفته شد این مخزن که ظرفیت ۱۰ لیتر مایع را دارد قابلیت تحمل فشار تا ۱۵ بار را دارا است و هم چنین به دلیل اینکه

درون مخزن رنگ زده شده، زنگ زدگی در آن رخ نخواهد داد. در این مخزن، شیرگازی را در قسمت بالای آن تعبیه کرده ایم برای حالتی که نیاز به تخلیه فشار گاز باشد. در مخزن طراحی شده، سیالات مورد استفاده (هوا و آب) تحت فشار قرار می گیرند. برای افزایش فشار این مخزن با توجه به اینکه کمپرسور استفاده شده دارای دو خروجی هست. مخزن دارای دو ورودی و خروجی است، یکی برای ورود آب به آن و دیگری برای تغذیه انژکتور آب است. فشار مخزن آب تنظیم شده و در طول تست توسط کمپرسور هواف فشار داخل مخزن ثابت نگه داشته شده است.



شکل ۳-۱۰- مخزن پرفشار آب

۳-۴-۸- سرعت سنج هوا

بادسنج حرارتی (هات وایر) بی سیم از سری Smart Sensor AR886 می باشد. بادسنج وسیله ای برای اندازه گیری سرعت جریان هوا می باشد. محدوده اندازه گیری سرعت باد از ۰ تا ۴۰ متر بر ثانیه و دقت اندازه گیری سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه می باشد. اندازه گیری سرعت جت هوا در نقطه برخورد دو جت توسط این سرعت سنج انجام شد. پرتابه مخصوص سرعت سنج هوا توسط یک پایه برای دقت در اندازه گیری در فاصله ۱۰ میلی متری انژکتور هوا قرار گرفت. جهت جریان هوا به صورت عمود به این پرتابه برخورد می کند، بی شک باید در نظر داشت که پرتابه هم به صورت جریان از بالا به پایین تنظیم شود. برای دقت در

اندازه‌گیری به دلیل اینکه سرعت‌سنج دقت بالایی دارد و اعداد نمایش داده در آن به‌طور لحظه‌ای تغییر می‌کند به همین دلیل هر تست چندین بار انجام شد.



شکل ۳-۱۱- دستگاه اندازه‌گیری سرعت هوا Smart Sensor AR886



شکل ۳-۱۲- نحوه اندازه‌گیری سرعت هوا در نقطه برخورد دو جت

۳-۵- سیستم ثبت تصویر

برای عکس‌برداری مناسب از پدیده پاشش، نیازمند به یک نورپردازی قوی هستیم؛ زیرا قطرات، برخی از پرتوهای نور را از خود عبور داده و برخی را منعکس می‌کنند. برای این منظور منبع نوری، یعنی پروژکتورها در نقاط مختلف قرار گرفتند تا بهینه‌ترین مکان برای عکس‌برداری مشخص شود. در موقعی که پروژکتورها جلوی انژکتورها قرار دارند، برای آنکه تصویر پاشش جت‌های برخوردی به‌خوبی واضح باشد، از یک مقوای سیاه‌رنگ در پشت انژکتور استفاده شد. هر آزمایش برای اطمینان از نتایج چندین بار تکرار شدند و محل

قرارگرفتن دوربین پرسرعت روبه‌روی انژکتورها بوده و سرعت شاتر دوربین در تمامی آزمایش‌ها، ۴۰۰۰ فریم بر ثانیه بود. پروژکتورها طوری مستقرشده‌اند که به توان هم از روبه‌رو و هم از پشت ستاپ به پدیده پاشش که در طی آزمایش‌ها اتفاق می‌افتد، نوردهی داشته باشیم.

۳-۶- اعتبارسنجی ستاپ آزمایش

در این قسمت با استفاده از ستاپ ساخته شده مشابه با آن چه پیش‌تر توسط آقای ژیا و همکاران [۵۱] انجام شده، آزمایشی انجام می‌شود. تا حد امکان سعی شده است تا شرایط آزمایش با شرایط آزمایش ژیا برابر باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از فروپاشی جت آب در جدول ۳-۲ می‌توان نتیجه گرفت که آزمایش انجام شده با ستاپ ساخته شده هماهنگی خوبی با آزمایش ژیا [۵۱] دارد.

جدول ۳-۲: مقایسه مشخصات آزمایش انجام شده با ستاپ ساخته شده و توسط ژیا [۵۱]

پارامترهای مورد بررسی	ستاپ ساخته شده مطالعه حاضر	ستاپ آزمایش ژیا
زاویه برخورد (درجه)	۶۰، ۴۵، ۳۰	۶۰، ۴۵، ۳۰
قطر انژکتور (میلی‌متر)	۱ میلی‌متر برای انژکتور هوا و آب	۱ میلی‌متر برای انژکتور هوا ۰/۶۸ میلی‌متر برای انژکتور آب
طول برخورد (میلی‌متر)	۱۰ میلی‌متر	۱۰ میلی‌متر
نرخ جریان آب (میلی لیتر بر دقیقه)	۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه	۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه
نرخ جریان هوا (گرم بر دقیقه)	۵، ۱۰، ۱۵، ۳۰ گرم بر دقیقه	۴/۴، ۶/۷، ۱۳/۵ و ۲۷ گرم بر دقیقه

فصل چہارم: نتیجہ حاصل

۴-۱- مقدمه

هدف اصلی از انجام این تحقیق، شناسایی پارامترهای تأثیرگذار بدون بُعد شده روی مشخصه‌های آتمیزاسیون اولیه یک صفحه جت آب، زاویه پاشش، اندازه و سرعت قطره در حضور جریان جت هوا است؛ به طور کلی، مشخصات فروپاشی یک جت که شامل مسیر حرکت جت و اندازه قطرات بوده، تابعی از ویژگی‌های فیزیکی دو سیال (آب و هوا) و نوع انژکتور است. در این مطالعه، گاز مورد استفاده ما هوا و مایع مورد استفاده آب است. این موارد نسبت‌های مخلوط مناسب پیش‌رانه‌هایی مانند توربین گازی و موتور موشک مایع را شبیه‌سازی می‌کنند. پارامترهای مورد بررسی در رفتار پاشش تولید شده توسط جت‌های برخوردی به پارامتر جریانی و پارامتر هندسی تقسیم می‌شوند. پارامتر جریانی شامل نسبت تکانه هوا به آب، نسبت شار تکانه هوا به آب، نسبت شدت جریان هوا به آب، عدد وبر و عدد رینولدز می‌باشد. پارامتر هندسی شامل هندسه و ابعاد قطر انژکتور، آرایش قرارگیری انژکتورها و زاویه تزریق انژکتورها است.

در این فصل به نتایج مربوط به ساختار و رفتار پاشش، طول فروپاشی جت آب و زاویه پاشش به دست آمده آزمایش‌ها با عکس‌برداری توسط دوربین پرسرعت خواهیم پرداخت. شرایط سیال‌های هوا و آب در دمای ۲۰ سانتی‌گراد و فشار اتمسفر در جدول ۴-۱ ذکر شده است. با توجه به این که آب مورد آزمایش، آب شهری شاهرود است در نتیجه، با داده‌های استاندارد مقداری متفاوت می‌باشد. همچنین مقدار متناظر عدد وبر در جدول ۴-۱ ارائه شده که شرایط عملیاتی مقادیر مورد استفاده برای مطالعه حاضر را خلاصه می‌کند. عدد وبر گازی علاوه بر وابستگی به سرعت جریان هوا در نقطه برخورد، به مشخصات سیال آب نیز بستگی دارد. آزمایش‌ها در شدت جریان‌های متفاوت هوای برخوردی، انجام شده‌اند که در جدول ۴-۲ قابل مشاهده هستند. بدین ترتیب با محاسبه نسبت تکانه هوا به آب، نسبت شار تکانه هوا به آب، عدد وبر گازی، عدد رینولدز آب و نسبت شدت جریان هوا به آب، اثر این چند پارامتر را روی نتایج سرعت سنجی و تعیین اندازه قطر قطرات، بررسی و تحلیل می‌شوند. این تذکر لازم است که محاسبات مربوط به سرعت خروجی انژکتور در ابتدا نیازمند به دانستن مقدار دقیق ابعاد خروجی انژکتور داریم. همچنین پارامترهای دیگر از قبیل

اندازه و قطر متوسط قطرات، سرعت متوسط قطرات با پردازش تصویر نرم افزارهای مختلف را ارائه خواهیم نمود. در آخر نیز نتایج به دست آمده با نتایج کارهای مشابه مقایسه می شود. بنابراین، با داشتن سرعت های مشخص هوا و آب طبق جدول ۴-۲ مقادیر پارامترهای ذکر شده، آورده شده است. در این فصل برای درک بیش تر رفتار و ساختار پاشش از انژکتور برخورد کننده هوا-آب، یک جت هوای عمودی برخورد کننده به همراه جت آب مایل در نظر گرفته شده است. به طور کلی می توان گفت که بازه تغییرات سرعت آب از ۱/۳۳ تا ۶/۶۵ متر بر ثانیه، تغییر می کند. بازه تغییرات سرعت هوا در نقطه برخورد از ۲۹/۸۵ تا ۱۷۹/۱ متر بر ثانیه، تغییر می کند.

جدول ۴-۱- خواص سیال های استفاده شده در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد

پارامتر	σ (N/m)	μ (N. s/m ²)	ρ (kg/m ³)	θ (m2/s)
آب	۰/۰۷۳۶	$۱/۰۰۵ \times ۱۰^{-۳}$	۹۹۸/۲	$۱/۰۰۷ \times ۱۰^{-۶}$
هوا	-	$۱/۸ \times ۱۰^{-۵}$	۱/۲	$۱/۵ \times ۱۰^{-۵}$

۴-۲- اعداد بی بعد مورد مطالعه

اعداد بدون بعد شده از مهم ترین پارامترها برای شناسایی انواع رژیم های جریان و فروپاشی صفحه جت آب در مسایل جریان جت برخوردی هستند. شبیه سازی تجربی پاشش برای مطالعه اثرات نرخ جریان آب و نرخ جریان جرمی هوا و زاویه برخورد بین دو جت انجام شد. در مطالعه جریان جت های برخوردی آب و هوا می توان پارامترهای تأثیرگذار را به صورت گروهی از اعداد بدون بُعد شده در نظر گرفت؛ با توجه به پژوهش انجام شده بر جت های برخوردی می توان اعداد بدون بُعد شده گوناگونی را در مسأله وارد کرد. در ادامه به اعداد بدون بُعد شده که در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است، می پردازیم. چندین پارامتر متناظر برای ارائه بهتر نتایج تعریف شده اند، از جمله نسبت شار اندازه تکانه هوا به آب^۱، نسبت اندازه تکانه

^۱Air to liquid jet momentum flux ratio

هوا به آب^۱، نسبت انرژی هوا به آب^۲، نسبت شدت جریان هوا به آب^۳، عدد ویر^۴ و عدد رینولدز^۵ در پاشش تولید شده، توسط جت های برخوردی نیروهای مختلفی مؤثر هستند؛ از این رو برای مشخص شدن میزان تأثیر این نیروها نیز اهمیت آنها از ۶ عدد بی بعد مهم در زمینه اتمیزاسیون جت های برخوردی استفاده شده است که به شرح زیر است.

عدد ویر به صورت نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی تعریف می شود و از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$We = \frac{\rho_g U_{imp}^2 d_l}{\sigma} \quad (۱-۴)$$

عدد رینولدز بیانگر نسبت نیروی اینرسی به نیروی لزجت است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$Re = \frac{U_l d_l}{\nu_l} \quad (۲-۴)$$

نسبت شار تکانه هوا به آب از رابطه زیر به دست می آید:

$$MFR = \frac{\rho_g U_{imp}}{\rho_l U_l} \quad (۳-۴)$$

نسبت تکانه هوا به آب از رابطه زیر به دست می آید:

$$MR = \frac{\dot{m}_g U_g}{\dot{m}_l U_l} \quad (۴-۴)$$

نسبت انرژی هوا به آب از رابطه زیر به دست می آید:

$$ER = \frac{\rho_g U_{imp}^2}{\rho_l U_l^2} \quad (۵-۴)$$

نسبت شدت جریان هوا به آب از رابطه زیر به دست می آید:

$$GLR = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_l} \quad (۶-۴)$$

^۱Air to liquid jet momentum ratio

^۲Air to liquid jet energy ratio

^۳Air to liquid ratio

^۴Weber number

^۵Reynolds number

که در آن ρ_g چگالی هوا، ρ_l چگالی آب، U_{imp} سرعت جت هوا در نقطه برخورد، U_l سرعت جت آب، $\dot{m}_g$ شدت جریان جرمی هوا، $\dot{m}_l$ شدت جریان حجمی آب، d_l قطر انژکتور آب، σ کشش سطحی بین سطح مشترک آب و هوا و θ_l ویسکوزیته سینماتیکی آب است.

انگلبرت و همکاران [۲۶] در سال ۱۹۹۵ بیان کردند که عدد وبر نمی‌تواند اندازه‌های قطره را در پاشش‌های حاصل مقیاس‌گذاری کند؛ در نتیجه پارامترهای MFR و MR عمدتاً برای مقیاس‌گذاری نتایج استفاده می‌شوند. عدد وبر تأثیرگذارترین پارامتر در تعیین رژیم‌های فروپاشی است. اعداد وبر به‌دست آمده با تغییر رژیم‌های فروپاشی جریان آب همراه است و همچنین قطر قطرات متفاوت خواهند بود. برای بررسی اندازه‌فرآیند فروپاشی در نقطه برخورد از عدد وبر گازی استفاده شد. عدد وبر یک پارامتر اساسی در فرآیند فروپاشی جت بوده و بر حسب تغییر در سرعت جریان هوا تغییر می‌کند. افزایش عدد وبر باعث خمشی بیش‌تر جت آب و در نتیجه کاهش طول فروپاشی خواهد شد. عدد وبر گاز توسط سرعت هوا در نقطه برخورد به‌دست می‌آید. در هر شدت حجمی ثابت آب، عدد وبر گازی تغییر می‌کند؛ برای مثال در هر شدت حجمی آب از ۵۰ تا ۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، ۴ عدد وبر گازی مختلف به‌دست می‌آید. از عدد رینولدز برای تعیین نوع جریان سیال استفاده شد. با افزایش سرعت خروجی آب، عدد رینولدز افزایش پیدا می‌کند. در نقطه برخورد دوجت، ۵ عدد رینولدز به‌دست می‌آید. در هنگام فروپاشی جت آب، عدد رینولدز ثابت و عدد وبر با افزایش سرعت هوا تغییر می‌کند؛ پس در نتیجه عامل اصلی فروپاشی جت آب عدد وبر گازی است.

جدول ۴-۲- سرعت نقطه برخورد، عدد وبر، عدد رینولدز، GLR، MR، MFR

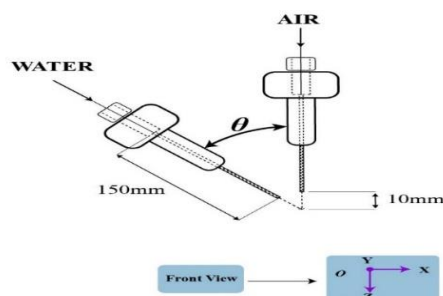
U_l (m/s)	U_g (m/s)	U_{imp} (m/s)	MFR	MR	GLR	Re	We_g	we_l	θ	$\dot{m}_g =$ (g/min)	$Q_L =$ (ml/min)
۱/۳۳	۷۶/۷۵	۲۹/۸۵	۰/۷	۲/۴	۰/۱	۱۳۲۱	۲۱	۱۸	۳۰،۴۵،۶۰	۵	۵۰
۱/۳۳	۱۵۳/۵	۵۹/۷۵	۲/۷۲	۹/۶۹	۰/۲	۱۳۲۱	۶۹	۱۸	۳۰،۴۵،۶۰	۱۰	۵۰
۱/۳۳	۲۳۰/۲۵	۸۹/۵۵	۶/۴۴	۲۰/۸۱	۰/۳	۱۳۲۱	۱۶۳	۱۸	۳۰،۴۵،۶۰	۱۵	۵۰
۱/۳۳	۴۶۰/۵	۱۷۹/۱	۲۰/۷۶	۸۳/۲۴	۰/۶	۱۳۲۱	۶۳۹	۱۸	۳۰،۴۵،۶۰	۳۰	۵۰

U_l (m/s)	U_g (m/s)	U_{imp} (m/s)	MFR	MR	GLR	Re	We_g	We_l	θ	$\dot{m}_g=$ (g/min)	$Q_L=$ (ml/min)
۲/۶۶	۷۶/۷۵	۲۹/۸۵	۰/۱۸	۰/۵۹	۰/۰۵	۲۶۴۲	۲۱	۹۸	۳۰,۴۵,۶۰	۵	۱۰۰
۲/۶۶	۱۵۳/۵	۵۹/۷۵	۰/۶۷	۲/۳۷	۰/۱	۲۶۴۲	۶۹	۹۸	۳۰,۴۵,۶۰	۱۰	۱۰۰
۲/۶۶	۲۳۰/۲۵	۸۹/۵۵	۴/۱۶	۵/۳۳	۰/۱۵	۲۶۴۲	۱۶۳	۹۸	۳۰,۴۵,۶۰	۱۵	۱۰۰
۲/۶۶	۴۶۰/۵	۱۷۹/۱	۱۷/۳۶	۲۱/۷۷	۰/۳	۲۶۴۲	۶۳۹	۹۸	۳۰,۴۵,۶۰	۳۰	۱۰۰
U_l (m/s)	U_g (m/s)	U_{imp} (m/s)	MFR	MR	GLR	Re	We_g	We_l	θ	$\dot{m}_g=$ (g/min)	$Q_L=$ (ml/min)
۳/۹۹	۷۶/۷۵	۲۹/۸۵	۰/۰۷	۰/۲۶	۰/۰۳	۳۹۶۳	۲۱	۲۱۷	۳۰,۴۵,۶۰	۵	۱۵۰
۳/۹۹	۱۵۳/۵	۵۹/۷۵	۰/۳۱	۱/۰۶	۰/۰۶	۳۹۶۳	۶۹	۲۱۷	۳۰,۴۵,۶۰	۱۰	۱۵۰
۳/۹۹	۲۳۰/۲۵	۸۹/۵۵	۰/۶۹	۲/۴	۰/۱	۳۹۶۳	۱۶۳	۲۱۷	۳۰,۴۵,۶۰	۱۵	۱۵۰
۳/۹۹	۴۶۰/۵	۱۷۹/۱	۲/۸۸	۹/۸۱	۰/۲	۳۹۶۳	۶۳۹	۲۱۷	۳۰,۴۵,۶۰	۳۰	۱۵۰
U_l (m/s)	U_g (m/s)	U_{imp} (m/s)	MFR	MR	GLR	Re	We_g	We_l	θ	$\dot{m}_g=$ (g/min)	$Q_L=$ (ml/min)
۵/۳۲	۷۶/۷۵	۲۹/۸۵	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۰۲۵	۵۲۸۴	۲۱	۳۹۵	۳۰,۴۵,۶۰	۵	۲۰۰
۵/۳۲	۱۵۳/۵	۵۹/۷۵	۰/۱۶	۰/۵۹	۰/۰۵	۵۲۸۴	۶۹	۳۹۵	۳۰,۴۵,۶۰	۱۰	۲۰۰
۵/۳۲	۲۳۰/۲۵	۸۹/۵۵	۰/۳۸	۱/۳۳	۰/۰۷۵	۵۲۸۴	۱۶۳	۳۹۵	۳۰,۴۵,۶۰	۱۵	۲۰۰
۵/۳۲	۴۶۰/۵	۱۷۹/۱	۱/۵۸	۵/۴۴	۰/۱۵	۵۲۸۴	۶۳۹	۳۹۵	۳۰,۴۵,۶۰	۳۰	۲۰۰
U_l (m/s)	U_g (m/s)	U_{imp} (m/s)	MFR	MR	GLR	Re	We_g	We_l	θ	$\dot{m}_g=$ (g/min)	$Q_L=$ (ml/min)
۶/۶۵	۷۶/۷۵	۲۹/۸۵	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۰۲	۶۶۰۵	۲۱	۶۰۸	۳۰,۴۵,۶۰	۵	۲۵۰
۶/۶۵	۱۵۳/۵	۵۹/۷۵	۰/۴۳	۰/۳۸	۰/۰۴	۶۶۰۵	۶۹	۶۰۸	۳۰,۴۵,۶۰	۱۰	۲۵۰
۶/۶۵	۲۳۰/۲۵	۸۹/۵۵	۱/۰۳	۰/۸۵	۰/۰۶	۶۶۰۵	۱۶۳	۶۰۸	۳۰,۴۵,۶۰	۱۵	۲۵۰
۶/۶۵	۴۶۰/۵	۱۷۹/۱	۴/۰۲	۳/۵۱	۰/۱۲	۶۶۰۵	۶۳۹	۶۰۸	۳۰,۴۵,۶۰	۳۰	۲۵۰

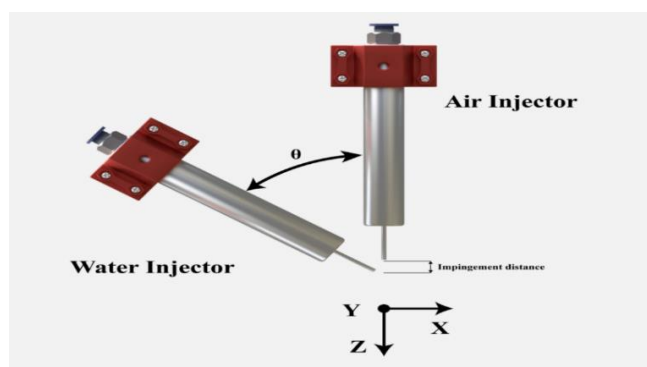
۴-۳- ساختار و رفتار پاشش

در مطالعه حاضر، مشخصات پاشش جت برخوردی به کمک هوا با استفاده از آب به عنوان سیال مایع و هوا پرفشار به عنوان گاز اتمیزه کننده مورد مطالعه قرار گرفته است. نحوه فرآیند اتمیزاسیون و اختلاط سیال در انژکتورهای برخوردی، بدین صورت است که سیال‌های مورد استفاده به صورت جت و با برخورد به همدیگر

است. برای بهبود کیفیت اتمیزاسیون، جت‌ها در هنگام برخورد با یکدیگر تحت زاویه خاصی با هم مخلوط می‌شوند. تصاویر ساختار پاشش در سه زاویه برخورد جت آب مختلف گرفته شده است. این تصاویر ساختار پاشش با استفاده از تکنیک عکس‌برداری پرسرعت با نور پس‌زمینه مستقیم با نرخ ۴۰۰۰ فریم بر ثانیه، ثبت شده‌اند. شکل ۴-۱، شماتیک پیکربندی تجربی مورد استفاده برای مطالعه مشخصات انژکتورهای برخوردی هوا روی جت آب و شکل ۴-۲ جزئیات انژکتور مورد استفاده برای این مطالعه را نشان می‌دهد. انژکتورهایی که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است، شامل دو لوله فولادی به قطر داخلی ۱ میلی‌متر برای جت آب و ۱ میلی‌متر برای جت هوا است. طول لوله‌های انژکتور آب و هوا ۱۵۰ میلی‌متر است که شرایط جریان کاملاً توسعه یافته در خروجی انژکتور را تضمین می‌کند. زاویه جت آب می‌تواند تغییر کند؛ در حالی که جت هوا عمودی است. فاصله بین خروجی انژکتور و نقطه برخورد هندسی O برای آب ۱۰ میلی‌متر و برای جریان هوا ۱۰ میلی‌متر است.



شکل ۴-۱- شماتیک پیکربندی انژکتور هوا و آب



شکل ۴-۲- جزئیات سه بعدی پیکربندی انژکتور هوا و آب برای ستاپ طراحی شده

زاویه برخورد بین جت‌های هوا و آب با استفاده از بازوهای طراحی شده در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، تغییر می‌کنند. شدت جریان حجمی جت آب در هر زاویه برخورد بین ۵۰-۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه و شدت جریان جرمی جریان هوا ۵-۳۰ گرم بر دقیقه است. شرایط تجربی مورد استفاده در مطالعه حاضر در جدول ۴-۱ نشان داده شده است. با تعویض موقعیت‌های جت آب و در نتیجه قراردادن جت هوا به صورت عمودی بین جت آب، مشاهده می‌شود که جت‌های آب به‌طور کامل به فروپاشی می‌رسند و باعث به وجود آمدن فرآیند اتمیزاسیون خواهند شد.

تصاویر پاشش در شدت جریان‌های آب و هوای مختلف گرفته شده از نمای روبه‌رو محور X و نمای کناری محور Y (شکل ۴-۳) را نشان می‌دهد. مراحل اتمیزاسیون توسط یک جت هوا است که به یک جت آب برخورد می‌کند، در انتقال انرژی بین این دو منجر به تغییر توپولوژی ساختار و فروپاشی جت آب می‌شود. ویسکوزیته در آب باعث مقاومت در مقابل جریان هوا شده و فرآیند فروپاشی جت آب به قطرات ریز با غلیظ بر نیروهای ویسکوز انجام می‌شود. جریان جت آب در جریان عمودی هوا، سبب به وجود آمدن ساختارهای پیچیده گردابه‌ای نوسانی یا همان دینامیک آشوبناک^۱ می‌شود. یکی از علت‌های فروپاشی صفحه جت آب به لیگامنت‌ها، حضور امواج تولید شده، توسط گردابه‌های نوسانی روی سطح جت آب در نقطه برخورد است. تعداد قطرات کوچک به دلیل تلاطم هوا که موجب تقویت لیگامنت‌ها و فروپاشی قطرات می‌شود، افزایش می‌یابد. ثابت نگه داشتن سرعت جریان آب و افزایش نرخ جریان هوا منجر به ناپدید شدن صفحه جت آب با افزایش تولید لیگامنت‌ها و قطرات و در نتیجه اتمیزه شدن بهتر می‌شود. در اتمیزه کردن هوا با جت آب، هوا با سرعت بالاتر روی سطح جت آب با سرعت پایین برخورد می‌کند که منجر به گسیختگی سریع جت آب به قطرات می‌شود؛ هنگامی که جریان هوا به یک جت آب برخورد می‌کند، نیروی

^۱Chaotic

آیرودینامیکی مؤثر بر سطح آب به اضافه نیروی خارجی، به شدت باعث گسیختگی می شود. در مجموع ساختار برهم کنش جریان های جت هوا و آب در یک نقطه برخورد خاص به شدت آشفته است.

در تحلیل تصاویر گرفته شده، دو نوع فروپاشی مختلف از فروپاشی صفحه جت آب دیده شد. این دو نوع فروپاشی شامل فروپاشی کیسه ای و فروپاشی فیبر هستند. فروپاشی صفحه جت آب به لیگامنت ها، اولین مرحله اتمیزاسیون در فروپاشی صفحه جت است. در این حالت ناپایداری های حاضر در نقطه برخورد سبب به وجود آمدن امواج نوسانی روی سطح صفحه جت می شوند که یکی از علت های فروپاشی صفحه جت آب به لیگامنت ها است. در این مراحل، لیگامنت های شکل گرفته در اتمیزاسیون اولیه به اندازه های مختلف تبدیل می شوند، سپس به قطرات درشت تر و بعد از آن به قطرات ریز تبدیل می شوند.

برای شدت جریان ثابت آب، تأثیر افزایش شدت جریان جرمی هوا در بهبود اتمیزاسیون به وضوح در شکل های ارائه شده در شکل ۳-۴ مشهود است. افزایش شدت جریان جرمی هوا علاوه بر در بهبود اتمیزاسیون، باعث کوچک تر شدن فروپاشی صفحه جت آب می شود. به محض اینکه جت هوا وارد ساختار جت آب می شود که بلافاصله، این کار باعث می شود که جریان هوا تشکیل صفحه آب را کم رنگ کند. این تعامل ذکر شده، عامل اصلی به وجود آمدن پدیده اتمیزاسیون است. سپس جت های آب به صورت های گوناگون اتمیزه می شوند که منجر به تشکیل پاشش به شکل فن^۱ اطلاق می شود. به زوایای شکل گرفته، بین دو جت، به اصطلاح شکل فن گفته می شود. صفحه آب قبل از فروپاشی مانند یک توده ضخیم است که به تدریج هرچه به سمت کناره ها می رود، نازک تر می شود. در تصاویر ۳-۴ مقدار زاویه پاشش با افزایش شدت جریان هوا، افزایش می یابد؛ زیرا جریان هوا مقدار تکانه و انرژی لازم را برای فروپاشی جت آب در نقطه برخورد فراهم می کند. این از اصول انژکتورهای برخوردی است و انرژی فشاری با یک سیال گازی

^۱Fan shape

^۲Liquid Film Break up

شکل طبق کاربردهای این مطالعه، تأمین می‌شود. در شدت جریان های کم آب، این افزایش بیش تر است؛ زیرا در این حالت، جریان هوا، به انرژی کمتری از هوا برای فروپاشی جت آب و تبدیل آن به رشته‌های ریز^۱ در پایین دست نقطه برخورد و در نهایت اتمیزه شدن^۲ به قطرات ریز، پس از وقوع اتمیزاسیون ثانویه احتیاج دارد. در شدت پایین جریان آب یعنی ۵۰ و ۱۰۰ میلی لیتر بر دقیقه در شدت جرمی ۵ گرم بر دقیقه، جت آب کمابیش با هسته خود که شکل مارپیچی^۳ دارد. در ادامه هسته در پایین دست نقطه برخورد دو جت به توده‌های بزرگ آب تجزیه می‌شود. می‌توان متوجه شد که در صورت پایین بودن سرعت هوا، صفحه جت آب تغییر محور می‌دهد. در شدت جریان آب ۵۰ و ۱۰۰ میلی لیتر بر دقیقه مشاهده می‌شود که یک جت آب شکسته نشده با الگوهای موجی^۴ ایجاد شده توسط هوا برخورد می‌کند و سپس در شدت جریان جرمی هوا ۵ گرم بر دقیقه این پدیده، رؤیت می‌شود. در شدت جریان جرمی ۵ گرم بر دقیقه، فشار هوا در نقطه برخورد بر فشار جت آب توانایی غلبه ندارد. برای فروپاشی کامل جت آب بایستی فشار دینامیکی هوا بر فشار دینامیکی آب غلبه کند.

در سرعت‌های پایین جت آب، افزایش سرعت جت آب منجر به افزایش اندازه صفحه آب می‌شود و قطرات از لبه‌های صفحه آب جدا می‌شوند. افزایش بیش تر سرعت باعث ایجاد امواج ضربه‌ای می‌شود که باعث فروپاشی سریع تر صفحه، آب می‌شوند. وارد کردن جت هوا در نقطه برخورد، ناپایداری‌های روی صفحه آب را افزایش می‌دهد و منجر به یک فروپاشی سریع تر می‌شود. طی این آزمایش‌ها مشاهده شد که افزایش نرخ شدت جریان جریان هوا، فروپاشی را تا حد زیادی به‌ویژه در سرعت‌های پایین آب بهبود می‌بخشد. با افزایش شدت جریان جرمی، جت آب به یک صفحه جت بال دار^۵ تبدیل می‌شود، سپس به لیگامنت‌ها تجزیه

^۱Ligaments
^۲Atomization
^۳Spiraling form
^۴Wavy pattern
^۵Flapping sheet

می‌شود و در ادامه به قطرات بسیار کوچک‌تر تبدیل می‌شود. جت هوا دارای عدد وبر بزرگ‌تر منجر به اتمیزاسیون بهتر می‌شود. در نرخ‌های جریان آب بالای ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه و همچنین نرخ‌های جریان جرمی ۵ تا ۱۰ گرم بر دقیقه، هر جت آب به یک کیسه ی آب^۱ با رپل^۲ روی سطح جت تشکیل می‌شود و با لیگامنت‌های نسبتاً ضخیم احاطه می‌شود. در این مورد فروپاشی اولیه، کیسه‌های آب به کیسه‌هایی تجزیه می‌شوند که در ادامه به قطرات کوچک تجزیه می‌شوند، درحالی که لیگامنت‌های اطراف به قطرات بزرگ‌تر تجزیه می‌شوند. با افزایش فشار بر صفحه جت آب، کیسه‌ها رشد می‌کنند و می‌پاشند. درواقع به وجود آمدن این کیسه یک حالت گذرا است که در یک لحظه کوتاه اتفاق می‌افتد و بلافاصله تبدیل به لیگامنت خواهد شد. لیگامنت‌هایی از نوع فیبر^۳ نیز برای موارد ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه در شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه مشاهده شدند.

در نرخ‌های شدت جریان جریان آب ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه و شدت جریان جرمی هوا کمتر از ۵ گرم بر دقیقه، جت آب تقریباً بدون تغییر مسیر در امتداد جهت اصلی خود حرکت می‌کند و به‌شیوه‌ای مشابه با رژیم ناشی از باد یک جت واحد^۴ رفتار می‌کند. در شدت جریان جرمی ۵ گرم بر دقیقه، یک صفحه آب آویخته را می‌توان در میدان نزدیک پاشش در شدت جریان‌های جریان آب ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه مشاهده کرد. سپس جت آب تا حدی از مسیر اصلی خود منحرف می‌شود.

با افزایش شدت جریان هوا در شدت جریان ۱۰ گرم بر دقیقه و ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه برخی از لیگامنت‌ها از صفحه بالزن^۵ تولید می‌شوند. با افزایش جریان هوا، لیگامنت‌ها قطعات

^۱Membrane

^۲Ripples

^۳Fiber type ligaments

^۴Wind-induced regime of a single jet

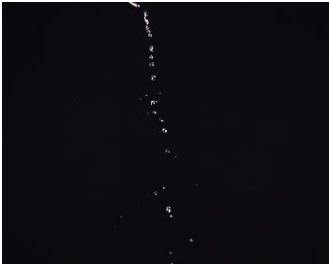
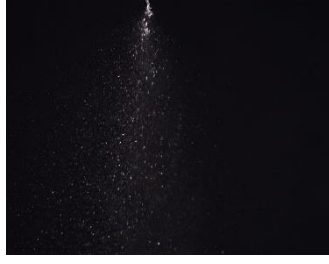
^۵Flapping sheet

تشکیل دهنده تحت تأثیر نیروهای آیرودینامیکی ناشی از اتمیزاسیون و هوای محیط قرار گرفته و به قطرات پایدار تبدیل می‌شوند و در ادامه تجزیه می‌شوند. در شدت جریان‌های ۱۵ و ۳۰ گرم بر دقیقه به وضوح قدرت نفوذ جت هوا در جت آب افزایش می‌یابد؛ یعنی در شدت جریان‌های موردنظر به سرعت در نقطه برخورد دو جت می‌تواند به جت آب نفوذ کند. با افزایش شدت جریان هوا، صفحه جت آب تولید شده در نقطه برخورد تغییر شکل بیش‌تری می‌دهد و طول فروپاشی آن در هر مرحله با افزایش شدت جریان، جرم هوا، کاهش پیدا می‌کند. میدان جریان در شدت جریان ۳۰ گرم بر دقیقه در حالت‌های ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه به شدت ناپایدار شده و تغییر می‌کند که در این حالت صفحه آب شکل گرفته به راحتی تشخیص داده نمی‌شود. اطراف ناحیه نقطه برخورد، قطرات به طور هم‌زمان تولید می‌شوند و اتمیزاسیون به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد که در این شرایط، قطرات ریز به سرعت افزایش می‌یابد. شدت جریان جرمی ۱۵ و ۳۰ گرم بر دقیقه به سرعت قادر به افزایش درخور توجه اتمیزه شدن شدت جریان جت‌های آب است. شدت جریان هوا نسبتاً پایین نشان می‌دهد که جت هوا با جت آب با صفحه‌ها یا کیسه‌های آب که با لگامنت‌های ضخیم احاطه شده‌اند، واکنش می‌دهد. با افزایش بیش‌تر شدت جریان هوا، لیگامنت‌ها که قطعات تشکیل دهنده را که تحت تأثیر نیروهای آیرودینامیکی ناشی از اتمیزاسیون و گازهای محیطی قرار می‌گیرند، به قطرات پایدار تبدیل و سپس تجزیه می‌شوند. در شدت جریان ۱۵ و ۳۰ گرم بر دقیقه برخی از نرخ‌های جریان آب، تند در نقطه برخورد نفوذ می‌کند. با افزایش فشار بر صفحه جت آب، کیسه‌ها رشد می‌کنند و می‌پاشند. درواقع به وجود آمدن این کیسه یک حالت گذرا است که در یک لحظه کوتاه اتفاق می‌افتد و بلافاصله تبدیل به لیگامنت خواهد شد.

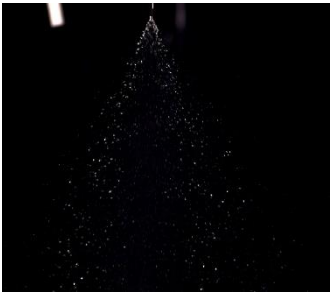
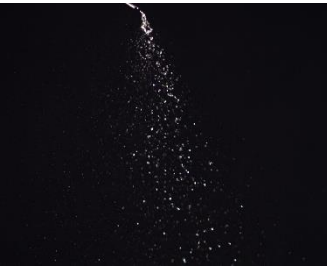
با افزایش شدت جریان هوا، باعث می‌شود که جت هوا به صفحه آب نفوذ کرده و پاشش مخروطی بیش‌تر انبساط پیدا می‌کند. این وضعیت در ۲۰۰-۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه و ۱۵-۳۰ گرم بر دقیقه، نشان داده می‌شود. در مقادیر بالای شدت جریان هوا، پس از اینکه جت هوا به صفحه آب نفوذ می‌کند، جت هوا

باعث منبسط شدن حجم آب می‌شود، حجم آب را متمیزه می‌کند و یک مخروط مه مانند را تشکیل می‌دهد. ظاهراً رژیم‌های فروپاشی مختلفی که در بالا توضیح داده شد، بسته به نسبت تکانه هوا به آب (MR) به وجود می‌آیند. آزمایش‌های مختلف با ثابت نگه‌داشتن شدت جریان آب و افزایش تدریجی شدت جریان هوا انجام شد که به معنی افزایش تدریجی نسبت تکانه آب به هوا است. با افزایش شدت جریان هوا نسبت شدت جریان آب ثابت همراه است با افزایش مقدار MR، جریان حجم آب در صفحه جت از جهت اصلی حرکت تزریق آب منحرف می‌شود.

شکل ۳-۴ نتایج میدان جریان پاشش در شدت جریان ۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه را نشان می‌دهد. در شدت جریان ۱۰ گرم بر دقیقه صفحه جت آب بیش‌تر تغییر شکل می‌دهد و طول صفحه جت آب کوتاه‌تر از مورد شدت جریان ۵ گرم بر دقیقه می‌شود. میدان جریان پاشش با افزایش نرخ جریان هوا به بیش از شدت جریان ۱۰ گرم بر دقیقه به شدت تغییر می‌کند. در شدت جریان ۱۵ گرم بر دقیقه صفحه آب ناشی از برخورد جت هوا به راحتی تشخیص داده نمی‌شود. در اطراف نقطه برخورد، قطرات به طور همزمان تولید می‌شوند و متمیزه شدن به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در شدت جریان ۳۰ گرم بر دقیقه، متمیزاسیون ثانویه نیز در ناحیه پایین دست نقطه برخورد افزایش می‌یابد. در شدت جریان ۳۰ گرم بر دقیقه صفحه آب ناشی از برخورد جت هوا به سختی قابل رویت است. در شدت جریان ۳۰ گرم بر دقیقه فراوانی قطرات ریز به سرعت افزایش می‌یابد. در نتیجه، واضح است که تزریق در حدود شدت جریان ۳۰ گرم بر دقیقه به طور قابل توجهی باعث بهبود متمیزاسیون جت‌های برخوردی می‌شود.

	$\dot{m}_g = 8 \text{ g/min}$	$\dot{m}_g = 10 \text{ g/min}$	$\dot{m}_g = 18 \text{ g/min}$	$\dot{m}_g = 30 \text{ g/min}$
Front view				
side view				

$Q_L = 50 \text{ ml/min}$, $Re = 1321$

	$\dot{m}_g = 8 \text{ g/min}$	$\dot{m}_g = 10 \text{ g/min}$	$\dot{m}_g = 18 \text{ g/min}$	$\dot{m}_g = 30 \text{ g/min}$
Front view				
Side view				

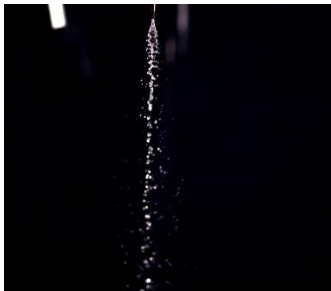
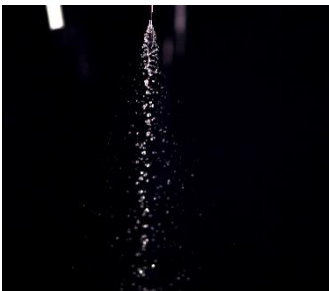
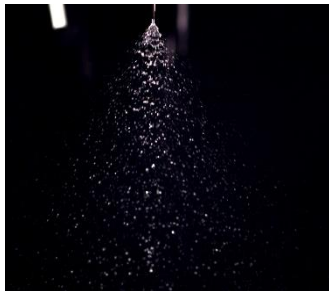
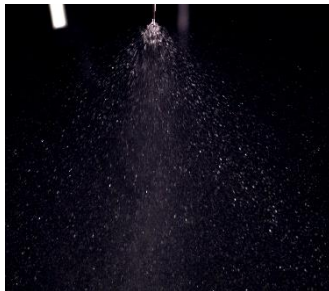
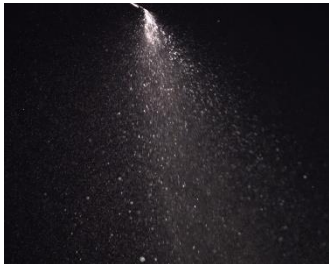
$Q_L = 100 \text{ ml/min}$, $Re = 2642$

	$\dot{m}_g = 8 \text{ g/min}$	$\dot{m}_g = 10 \text{ g/min}$	$\dot{m}_g = 18 \text{ g/min}$	$\dot{m}_g = 30 \text{ g/min}$
Front view				
Side view				

$Q_L = 150 \text{ ml/min}$, $Re = 3963$

	$\dot{m}_g = 8 \text{ g/min}$	$\dot{m}_g = 10 \text{ g/min}$	$\dot{m}_g = 18 \text{ g/min}$	$\dot{m}_g = 30 \text{ g/min}$
Front view				
Side view				

$Q_L = 200 \text{ ml/min}$, $Re = 5284$

	$\dot{m}_g = 8 \text{ g/min}$	$\dot{m}_g = 10 \text{ g/min}$	$\dot{m}_g = 15 \text{ g/min}$	$\dot{m}_g = 30 \text{ g/min}$
Front view				
Side view				

$Q_L = 250 \text{ ml/min}$, $Re = 6605$

شکل ۴-۳- ساختار پاشش در شدت جریان‌های مختلف در زاویه ۴۵ درجه نمای روبه‌رو-نمای کنار

تصاویر بزرگ نمایی شده از میدان نزدیک جریان دو جت، همان‌طور که در شکل ۴-۴ نشان داده شده‌است، جزئیات فرآیند فروپاشی جت آب را نشان می‌دهد. براساس تصاویر گرفته در شکل ۴-۴، رژیم‌های مختلف برهم‌کنش جت هوا روی آب را می‌توان مشاهده کرد. در شکل ۴-۴ نرخ جریان‌های مختلف آب و هوا، هم‌چنین تعداد عدد وبر، MFR، MR و GLR به نمایش درآمده‌اند. هنگامی که جت هوا در شدت جریان پایین ۵ گرم بر دقیقه، نسبت به شدت جریان پایین آب در ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، جت آب برخورد می‌کند، همان‌طور که در شکل ۴-۴ مشاهده می‌شود که در نمای روبه‌رو جت تبدیل به یک صفحه آب تا حدودی پهن می‌شود.

در سرعت‌های پایین جریان گاز و آب، در شدت جریان ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه و ۵ گرم بر دقیقه، جت آب به‌صورت شکل مارپیچی^۱ با فروپاشی حباب‌های بزرگ آب^۲ تغییر شکل می‌یابد (از نمای کناری). با افزایش شدت جریان هوا در یک شدت جریان آب مشخص، جت آب از مسیر اصلی خود خم می‌شود و با توجه به افزایش شدت جریان هوا میزان خم شدن بیش‌تر می‌شود. در این حالت می‌توان برای این مورد خاص ایجاد صفحه آب و تولید بعدی غشای آب و تجزیه، آن را مشاهده کرد. در شدت جریان ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه و ۱۰ گرم بر دقیقه با افزایش برهم‌کنش میان دو جت، صفحه جت آب نسبت به شدت جریان ۵ گرم بر دقیقه بیش‌تر تغییر محور پیدا کرده و نوسانی‌تر می‌شود. افزایش تغییر محور صفحه جت آب باعث ناپایدار شدن جت آب و فروپاشی سریع‌تر آن می‌شود. شدت مارپیچی مانند جت آب در شدت جریان ۱۰ گرم بر دقیقه افزایش می‌یابد. همان‌طور که بین دو شدت جریان ۵ و ۱۰ گرم بر دقیقه مقایسه می‌شود شاهد این هستیم که جت آب راحت‌تر به فروپاشی می‌رسد. با افزایش شدت جریان جرمی به حدود ۱۰ گرم بر دقیقه در نرخ جریان هوا، می‌توان مشاهده کرد که ایجاد صفحه‌های آب توسط لیگامنت‌ها و لبه‌ها^۳

^۱Spiraling form

^۲Large blobs

^۳Rims

ضخیم احاطه شده است. تحت فشار آیرودینامیکی در نقطه برخورد، صفحه‌های آب در اثر این فشار تغییر شکل می‌دهند و کیسه‌ها^۱ یا غشاها^۲ تشکیل می‌شوند. این کیسه‌ها بعداً به تعدادی زیادی قطرات آب با اندازه‌های متفاوت تقسیم می‌شوند. جت به شکل یک کیسه در می‌آید، زمانی که نیروی فشار هوای دخیل آن بیش‌تر از نیروی تنش سطحی می‌شود، ناگهان کیسه می‌ترکد. به علت نیروی فشار بالا در شدت جریان‌های ۱۰، ۱۵ و ۳۰ گرم بر دقیقه، شاهد این اتفاق به کرات هستیم. قطرات حاصل از فروپاشی کیسه‌ای دارای قطره‌های مختلفی هستند. افزایش فشار بر صفحه جت آب، کیسه‌ها رشد می‌کنند و می‌پاشند. درواقع به وجود آمدن این کیسه یک حالت گذرا است که در یک لحظه کوتاه اتفاق می‌افتد و بلافاصله تبدیل به لیگامنت خواهد شد. در اتمیزاسیون ثانویه با تبدیل لیگامنت‌ها به قطرات، در کنار کیسه‌ها شاهد قطرات بزرگ‌تری هستیم. در نرخ‌های جریان بالاتر، رابطی که در آن جت هوا به جت آب در نقطه برخورد مواجه می‌شود و منجر به فروپاشی فیبر می‌شود. جریان بعد از فروپاشی جت آب، لیگامنت‌های فیبری آب که منجر به تولید قطرات کوچک می‌شوند را می‌توان مشاهده کرد. (برای شدت جریان ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه و ۱۵ و ۳۰ گرم بر دقیقه)

در شدت جریان ۱۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه تکه‌های آب متراکم وجود دارد، وجود چنین تکه‌هایی به حرکت ساختارهای بزرگ به جت هوا مربوط می‌شود که مسئول فروپاشی صفحه‌های آب و لیگامنت‌ها هستند. این موارد بعداً به سمت پایین دست منتقل می‌شوند و با حرکات هوای آشفته تعامل دارند. هم‌چنین جالب توجه است که در مقادیر نسبتاً بزرگ MFR معمولاً بزرگ‌تر از حدود ۱، اتمیزاسیون با کیفیت‌تر است و این نیز به دلیل افزایش شدت جریان جریان هوا، طول فروپاشی جت آب کوتاه‌تر شده و تبدیل لیگامنت‌ها به قطرات بسیار ریزتر است. لیگامنت‌های نوع فیبر شکل می‌گیرند و سپس مشاهده می‌شوند که از طریق مکانیزم فروپاشی نوع فیبری به قطرات تجزیه می‌شوند. لیگامنت‌های نوع فیبر برای اعداد وبر بزرگ‌تر از ۱۰۰ بهتر قابل مشاهده می‌باشد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که این نوع فیبرها با افزایش عدد وبر، اندازه آن کاهش

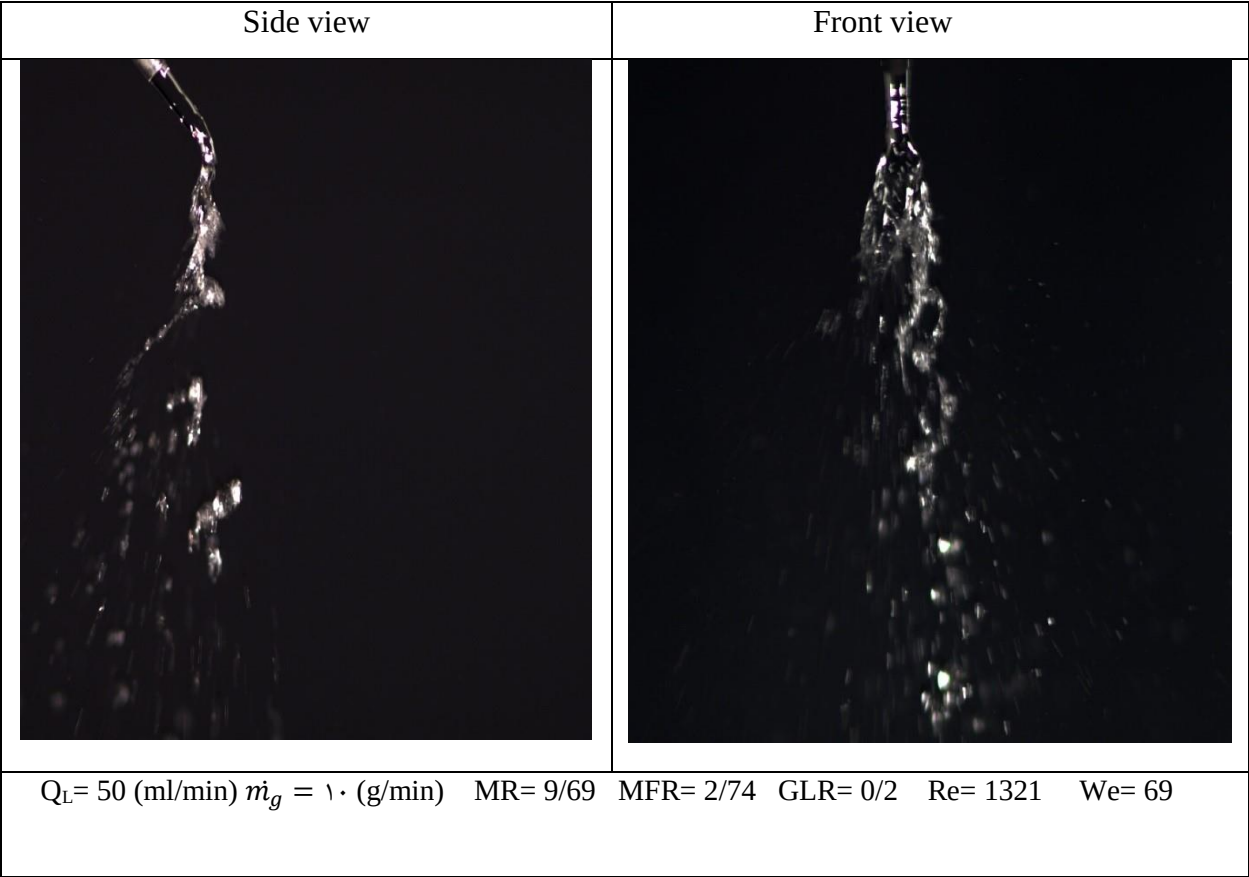
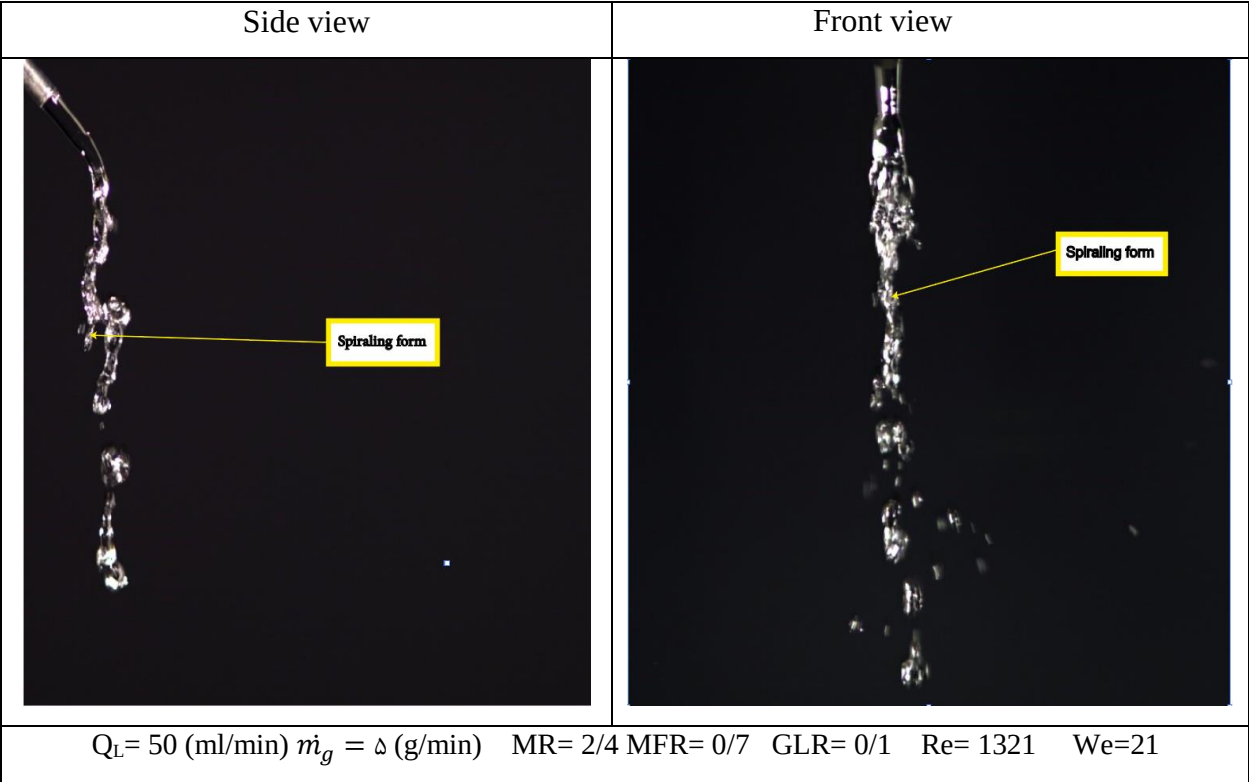
^۱Bags

^۲Membranes

پیدا می‌کند. با این حال، افزایش سرعت هوا برای یک سرعت آب معین نه تنها عدد وبر بلکه هم‌چنین نسبت اندازه MFR افزایش می‌یابد. اندازه لیگامنت در نزدیکی میدان در شکل‌های ۴-۴ مشابه به نظر می‌رسد، اما در MFR پایین‌تر یک هسته آب دست‌نخورده در پایین‌دست باقی می‌ماند. هنگامی که عدد وبر بزرگ است، بنابراین MFR، پارامتر حیاتی در تعیین طول صفحه جت آب است. نکته جالب توجه دیگر در این تجسم‌های ثابت، حالت مارپیچ قوی^۱ و شتاب صفحه جت آب، به خصوص در مقادیر پایین‌تر عدد وبر است. هم‌چنین باید توجه داشت که برای تصاویر ۴-۴ برای مقادیر MFR بزرگ‌تر از ۵ همیشه حجم نسبتاً بزرگی از آب هنوز در پایین‌دست وجود دارد. دیده می‌شود که این حجم‌ها در MFR بزرگ‌تر و MR کوچک‌تر، کوچک‌تر و تعداد آن‌ها کمتر می‌شود. با افزایش بیش‌تر شدت جریان هوا، جت آب خم می‌شود و در صفحه نرمال به صفحه اصلی جت‌ها حرکت می‌کند. ابعاد صفحه آب کوچک‌تر شده و اندازه قطرات تقریباً یکنواخت از لبه‌های آن ظاهر می‌شود که ممکن است در شدت جریان آب ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه مشاهده شود. در شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه و شدت حجمی ۱۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه هنگامی که دو جت در نقطه برخورد در فاصله ۱۰ میلی‌متری با هم تعامل دارند. به‌علت فشار زیاد جت هوا در ۱۵ گرم بر دقیقه مشاهده می‌شود که نقطه برخورد دو جت بسیار آشفته است. با افزایش شدت جریان جرمی از ۵ به ۳۰ گرم بر دقیقه شدت آشفتگی در نقطه برخورد دو جت بیش‌تر می‌شود. عدد وبر به‌دست آمده در این حالت عدد ۱۶۳ می‌باشد. عدد فروپاشی در این حالت از نوع فروپاشی نوع فیبر است. در هنگام برخورد این دو جت بعد از فروپاشی صفحه جت آب لیگامنت‌هایی از نوع فیبر تولید می‌شود. به علت افزایش تکانه جت هوا تعداد لیگامنت‌ها افزایش می‌یابد. شدت حجمی ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه و شدت جرمی ۵ گرم بر دقیقه، صفحه جت آب به طول کامل منحرف نمی‌شود و جت به صورت مایل حرکت می‌کند. در این سرعت هوا توانایی کامل برای منحرف کردن جت آب را ندارد.

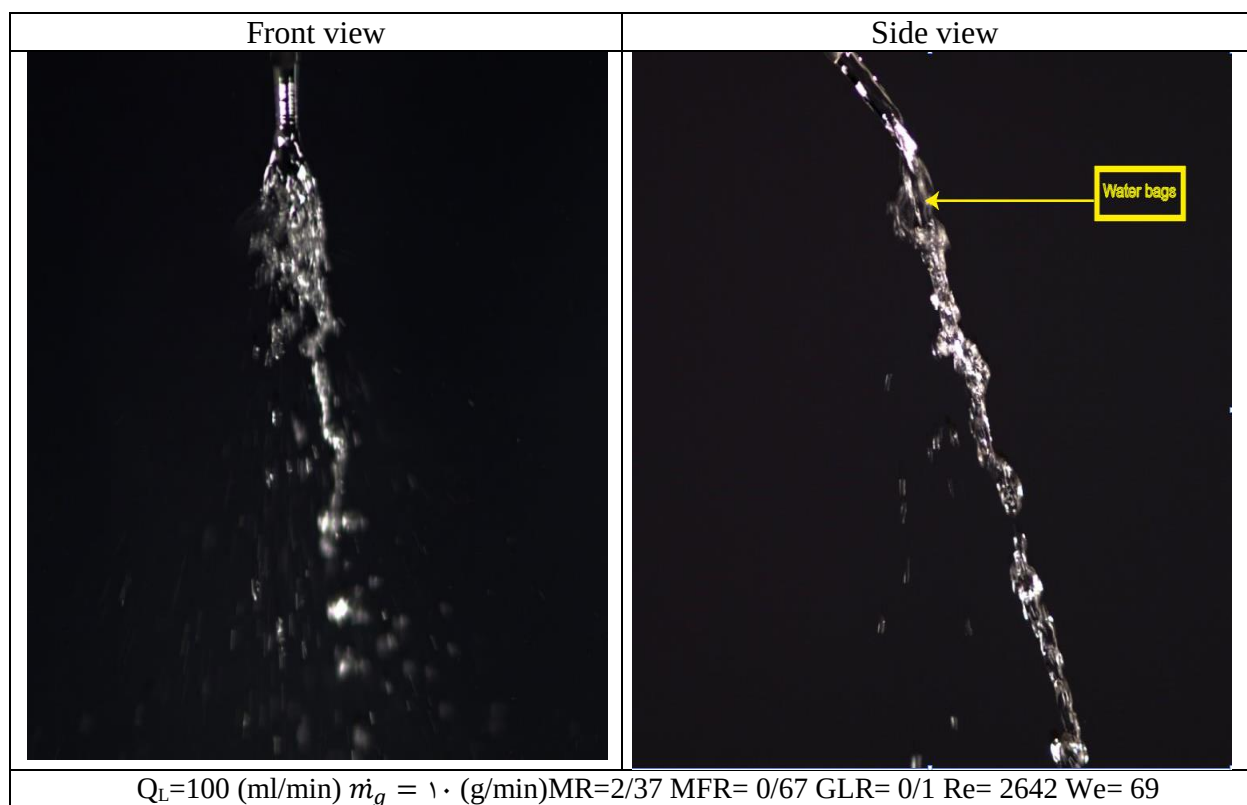
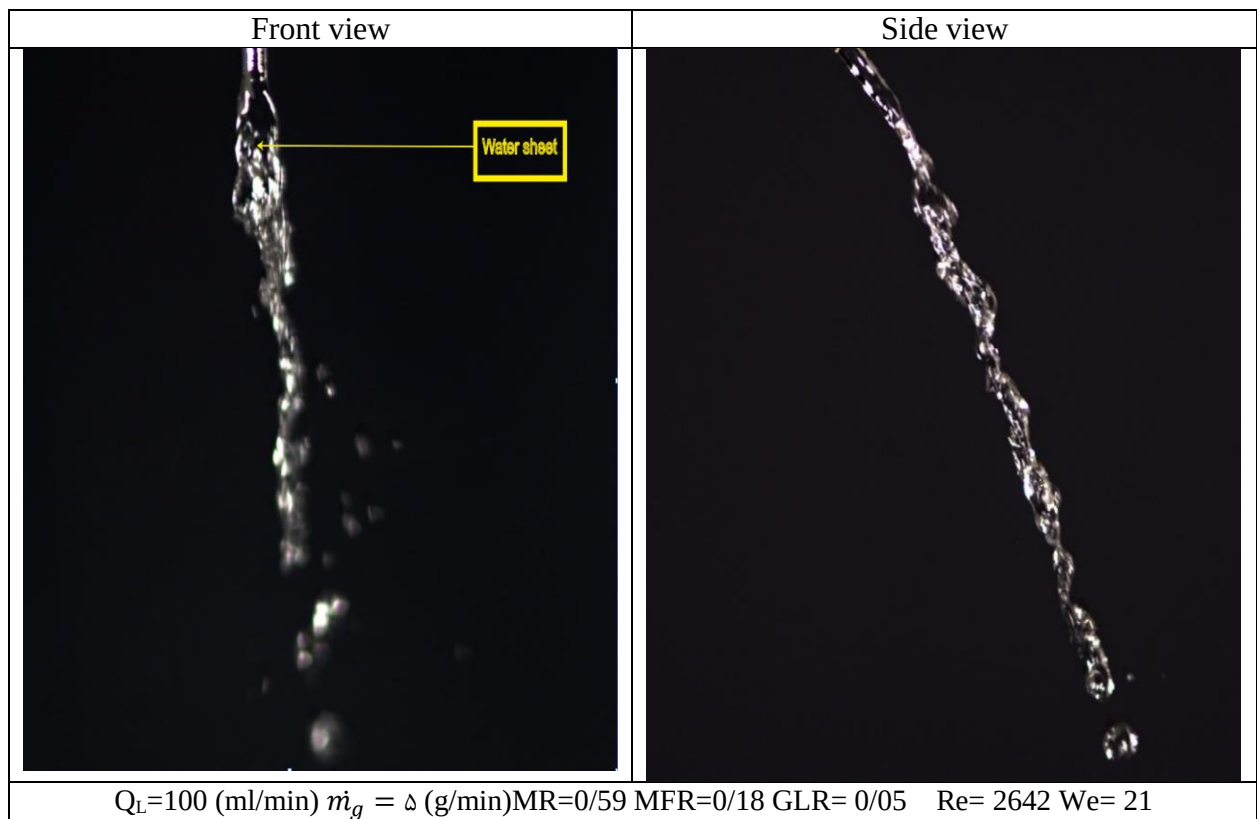
^۱Strong spiral mode

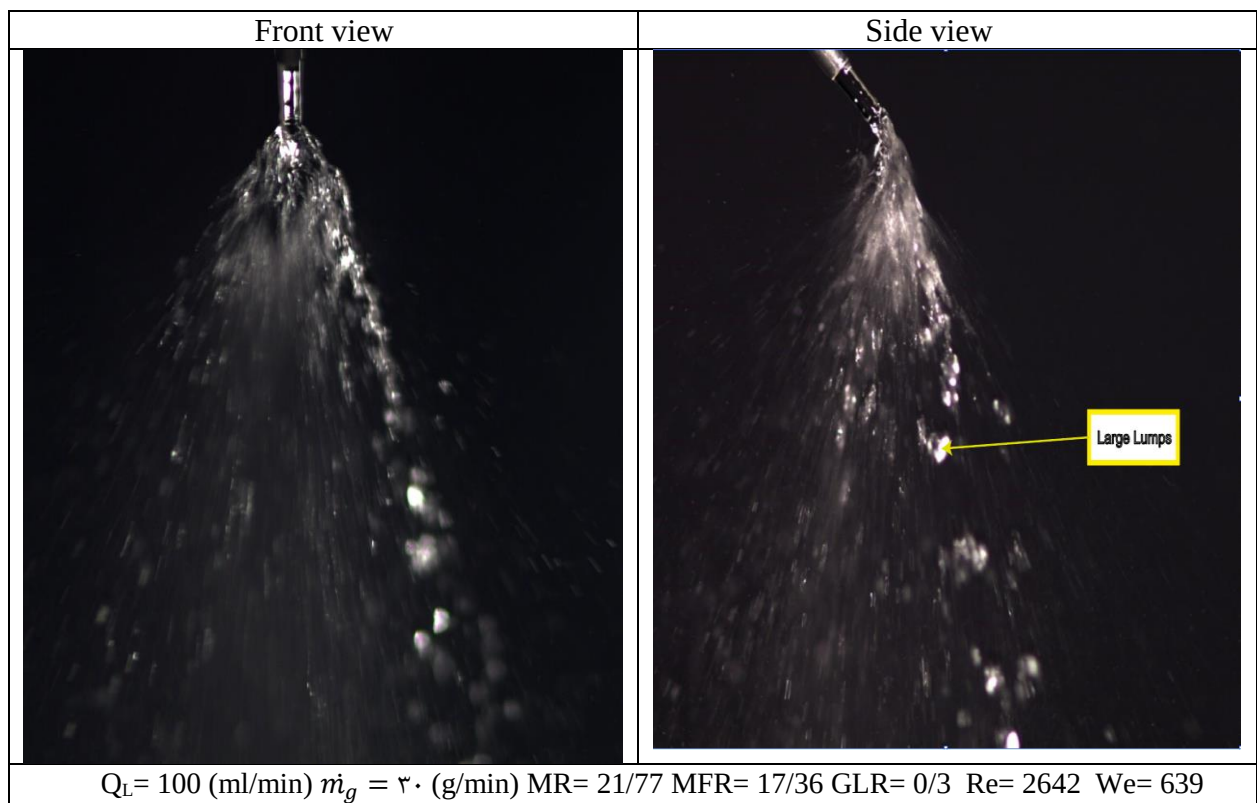
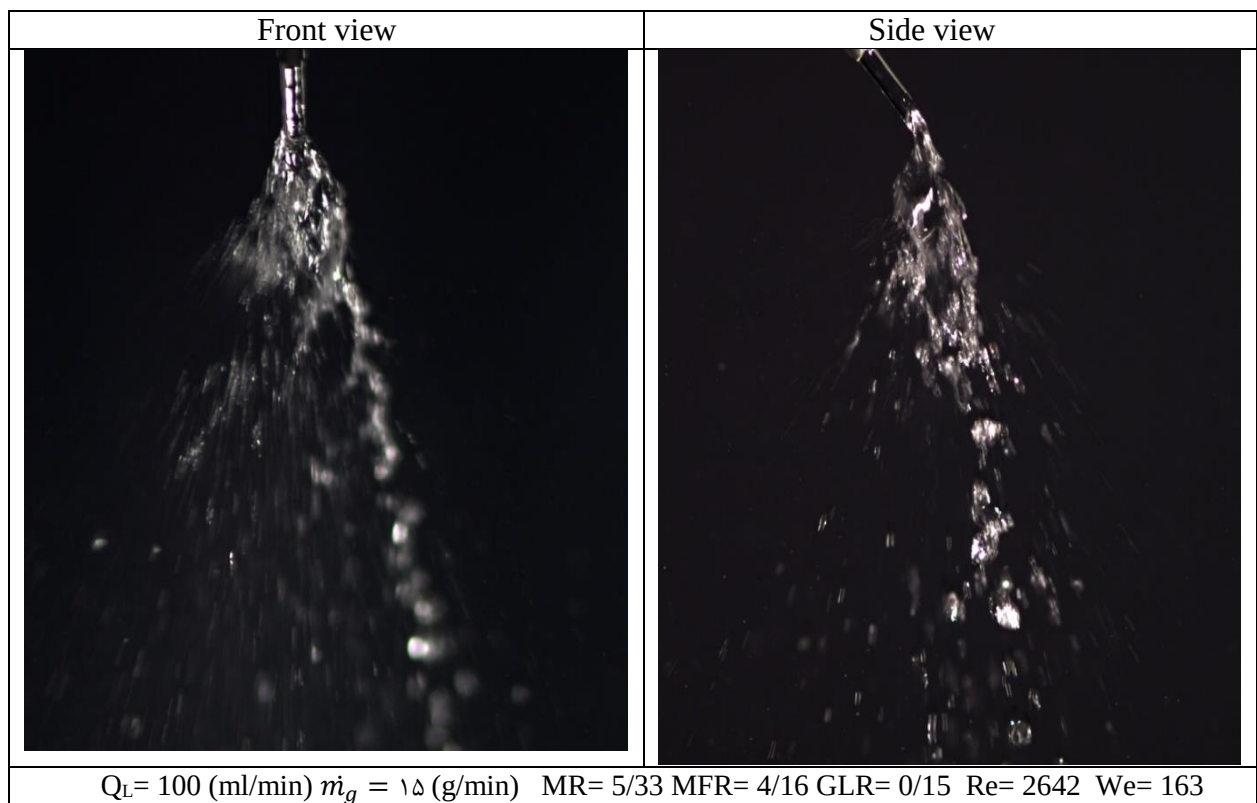
^۲ Lumps

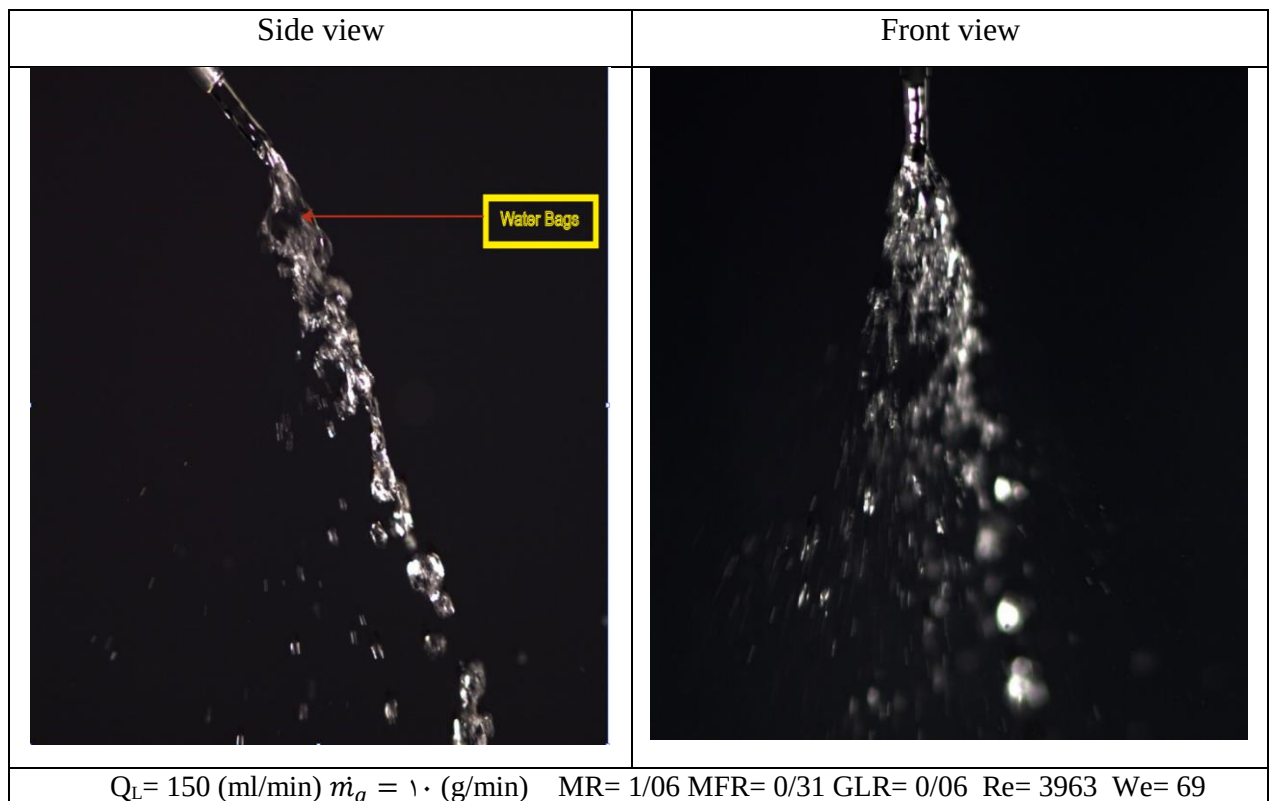
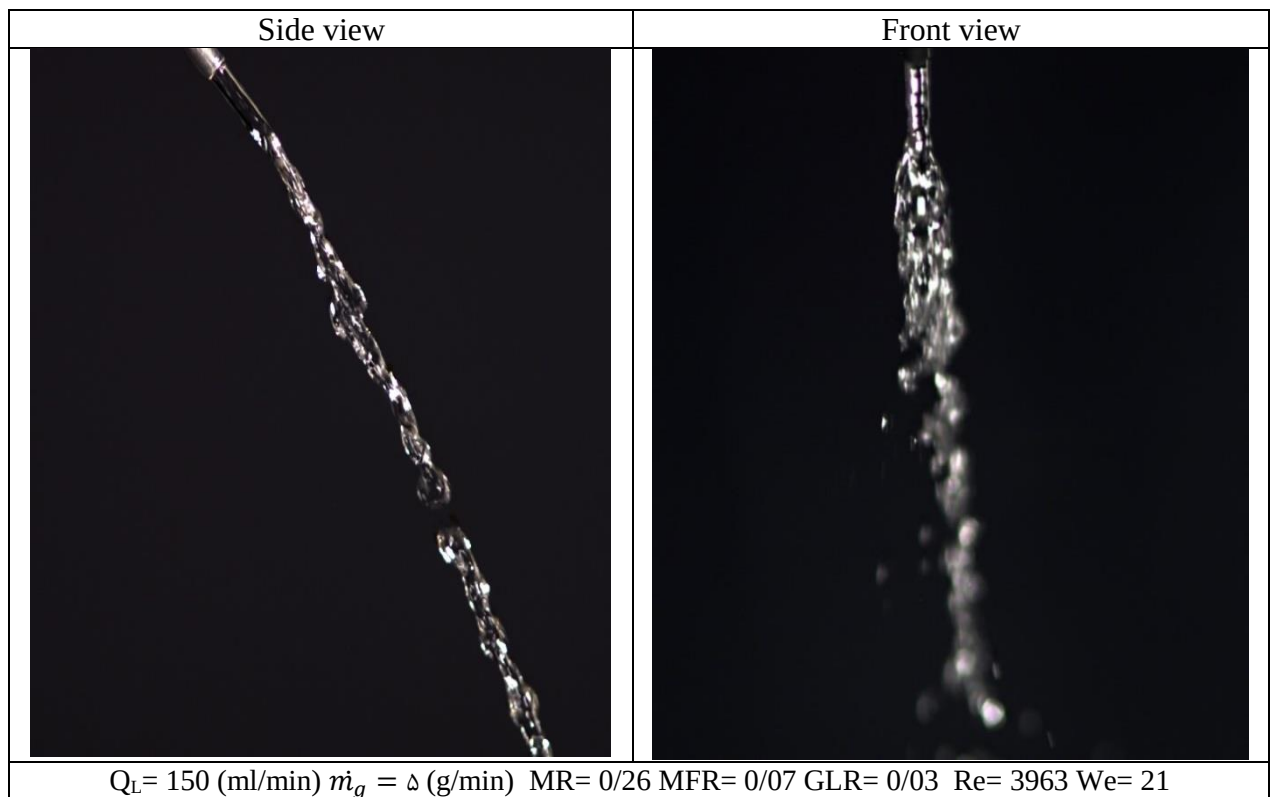


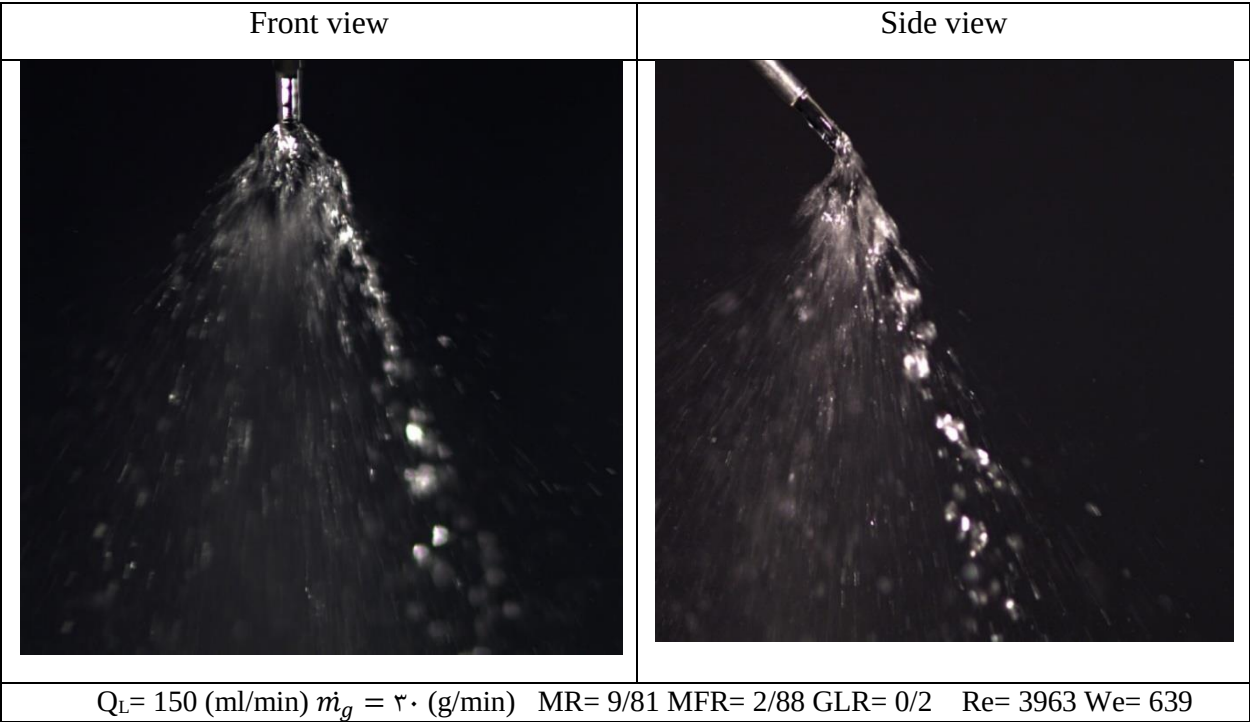
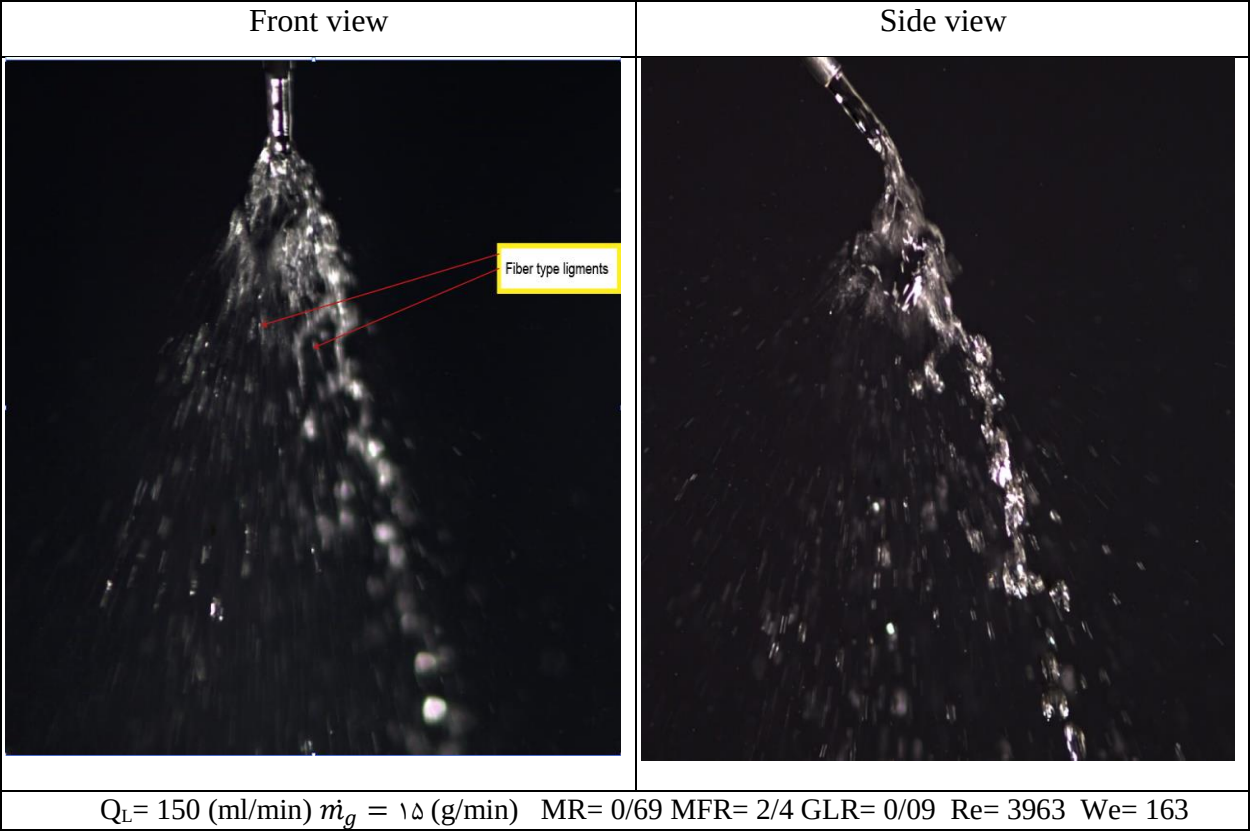
Side view	Front view
	
$Q_L = 50 \text{ (ml/min)}$ $\dot{m}_g = 15 \text{ (g/min)}$ $MR = 2/81$ $MFR = 6/44$ $GLR = 0/3$ $Re = 1321$ $We = 163$	

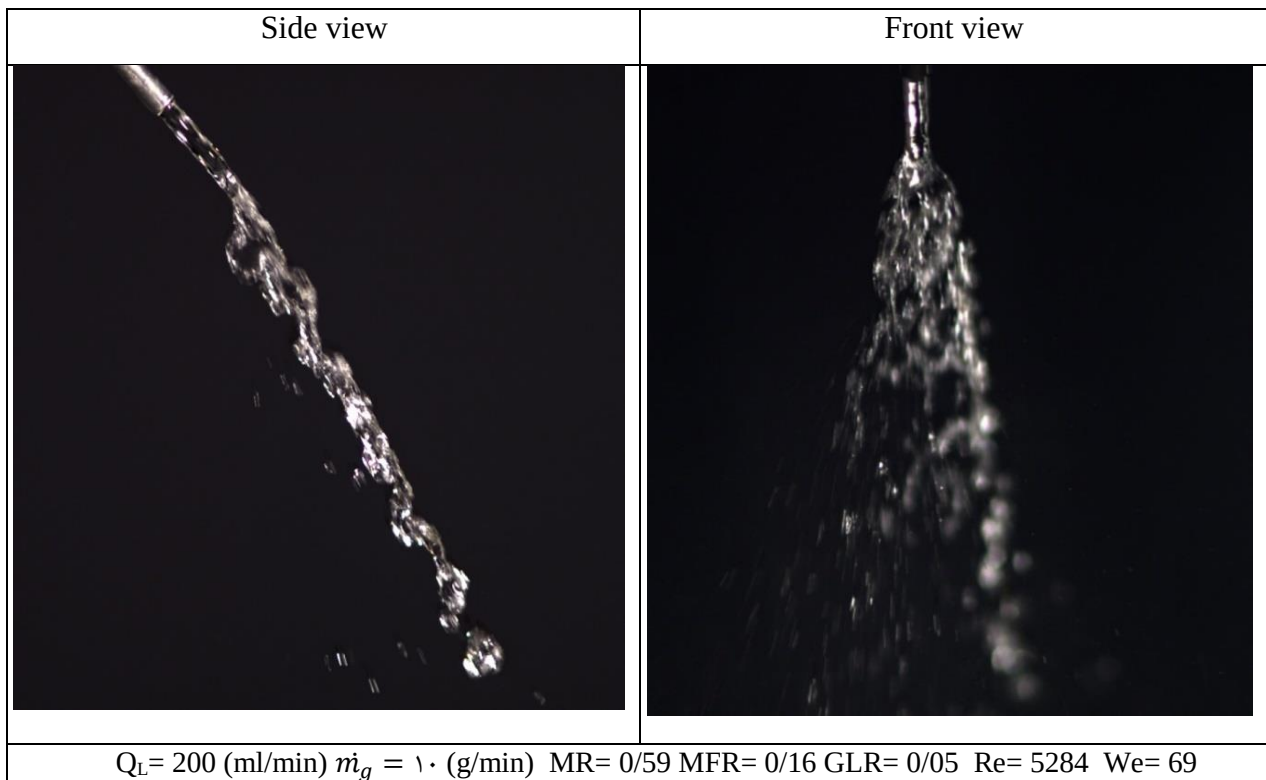
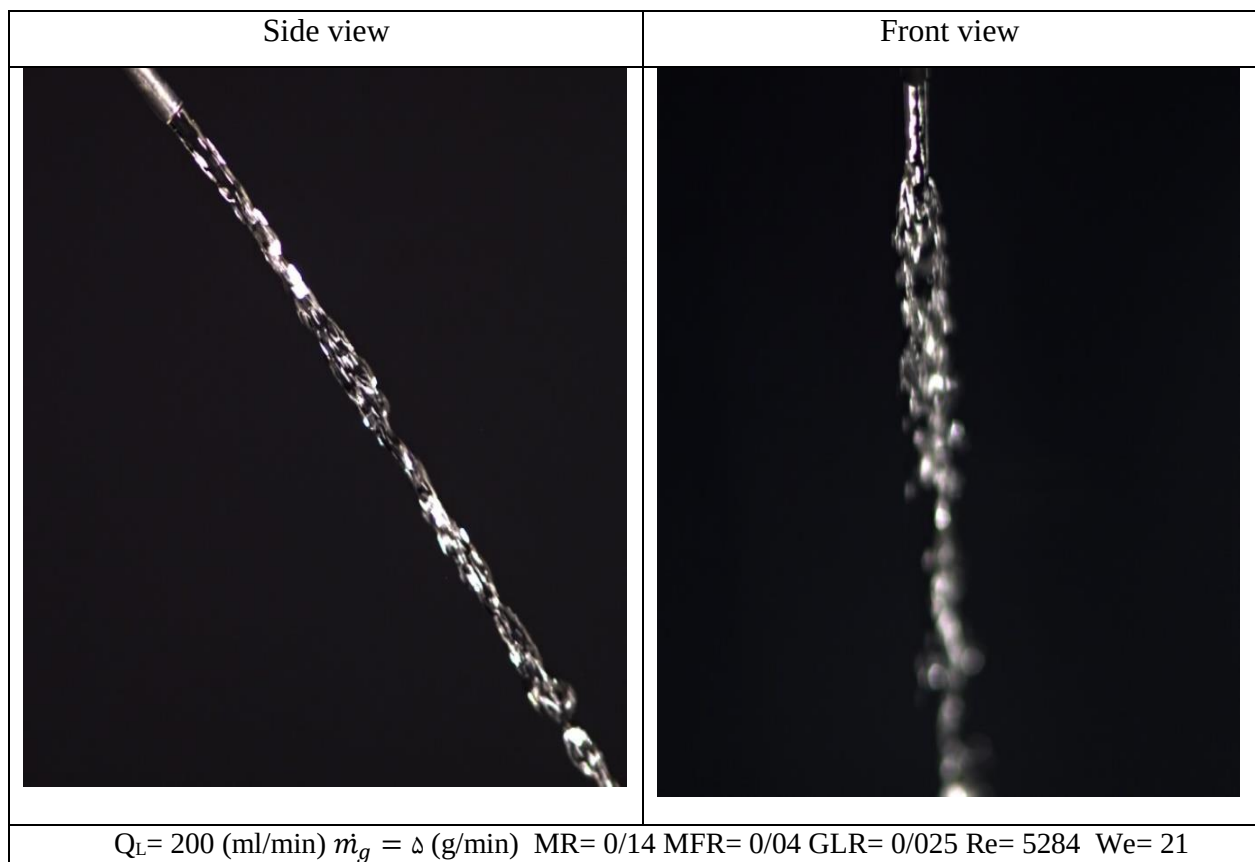
Side view	Front view
	
$Q_L = 50 \text{ (ml/min)}$ $\dot{m}_g = 30 \text{ (g/min)}$ $MR = 83/24$ $MFR = 20/76$ $GLR = 0/6$ $Re = 1321$ $We = 639$	

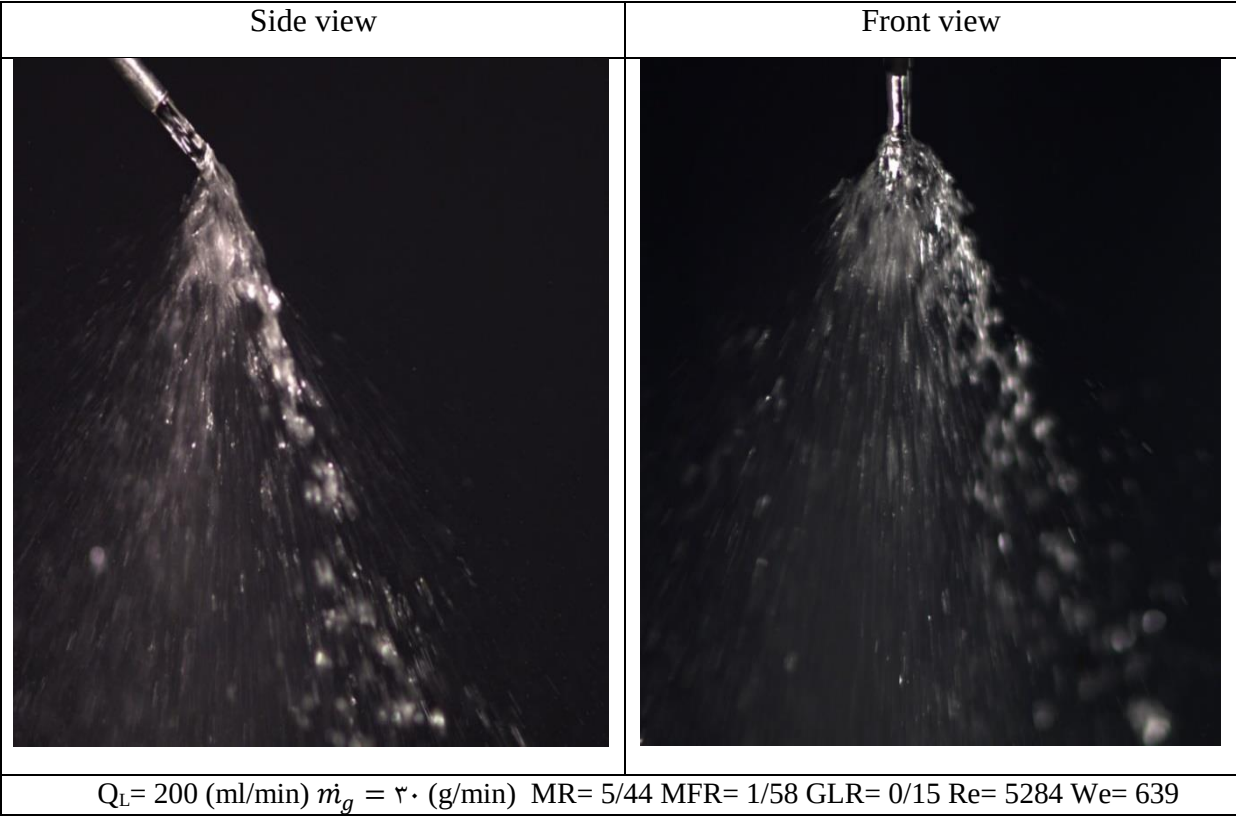
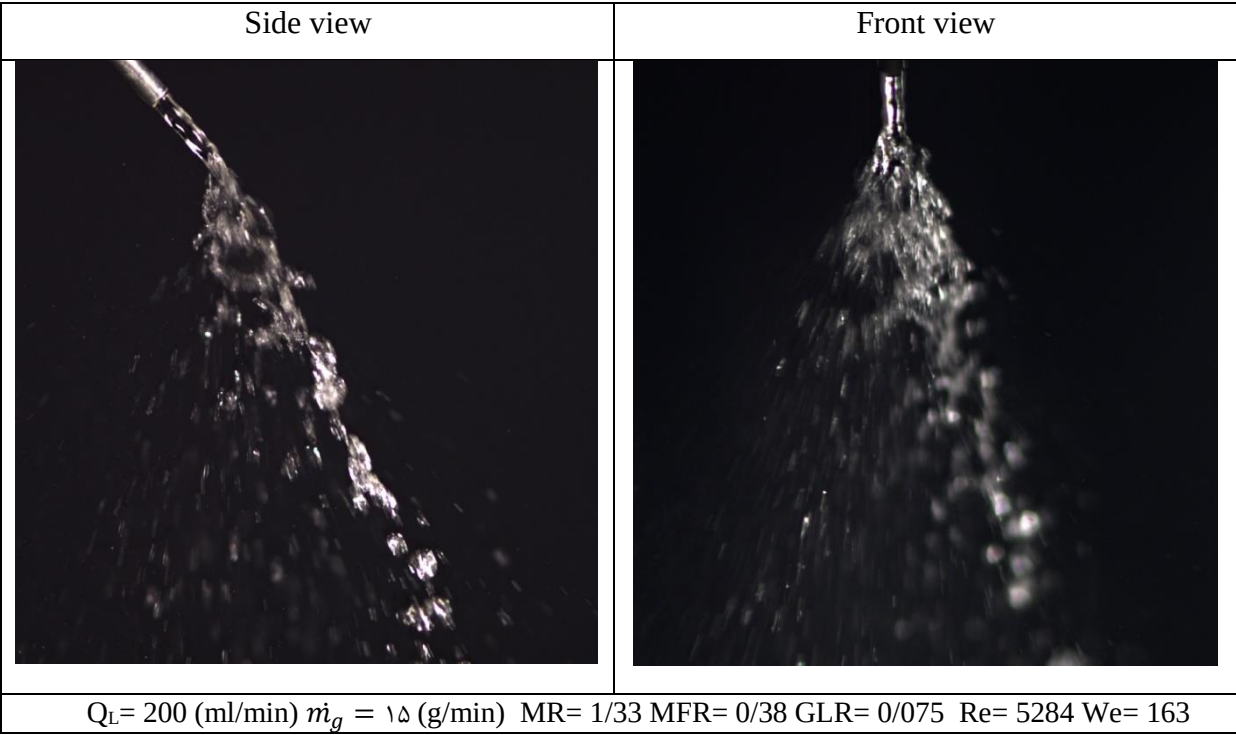


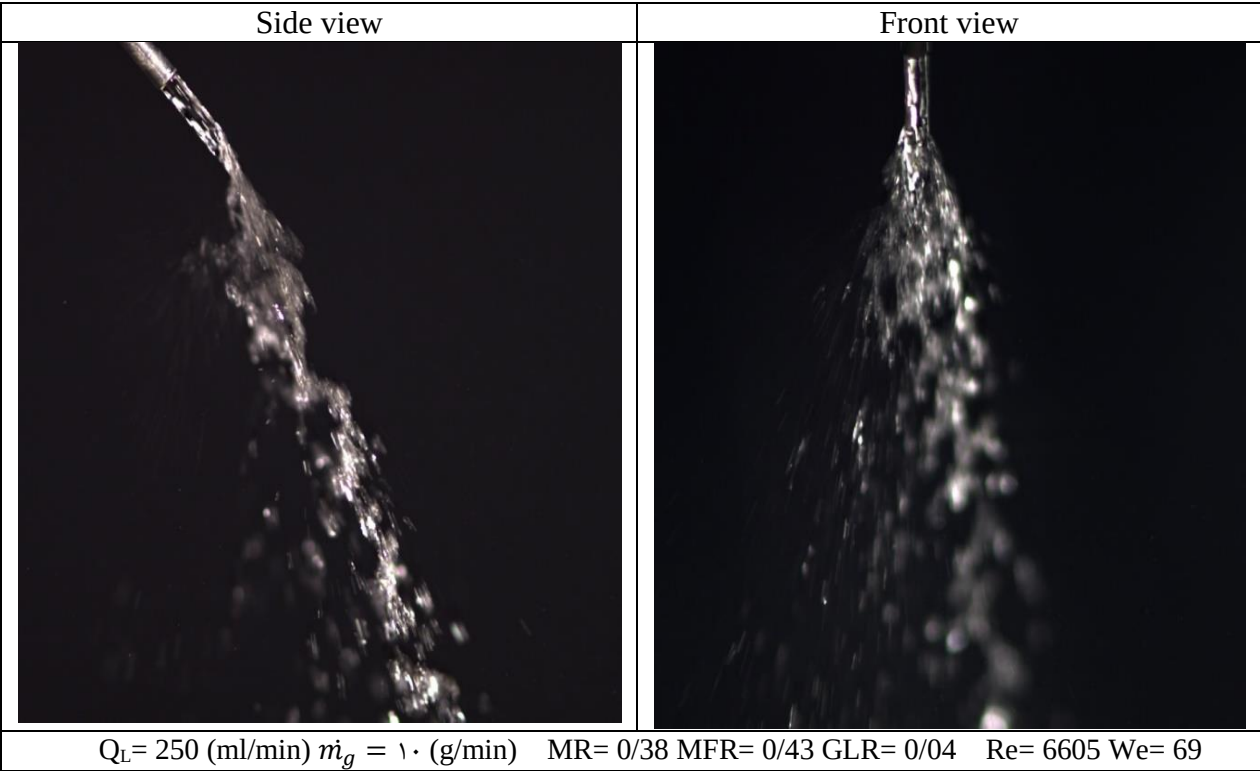
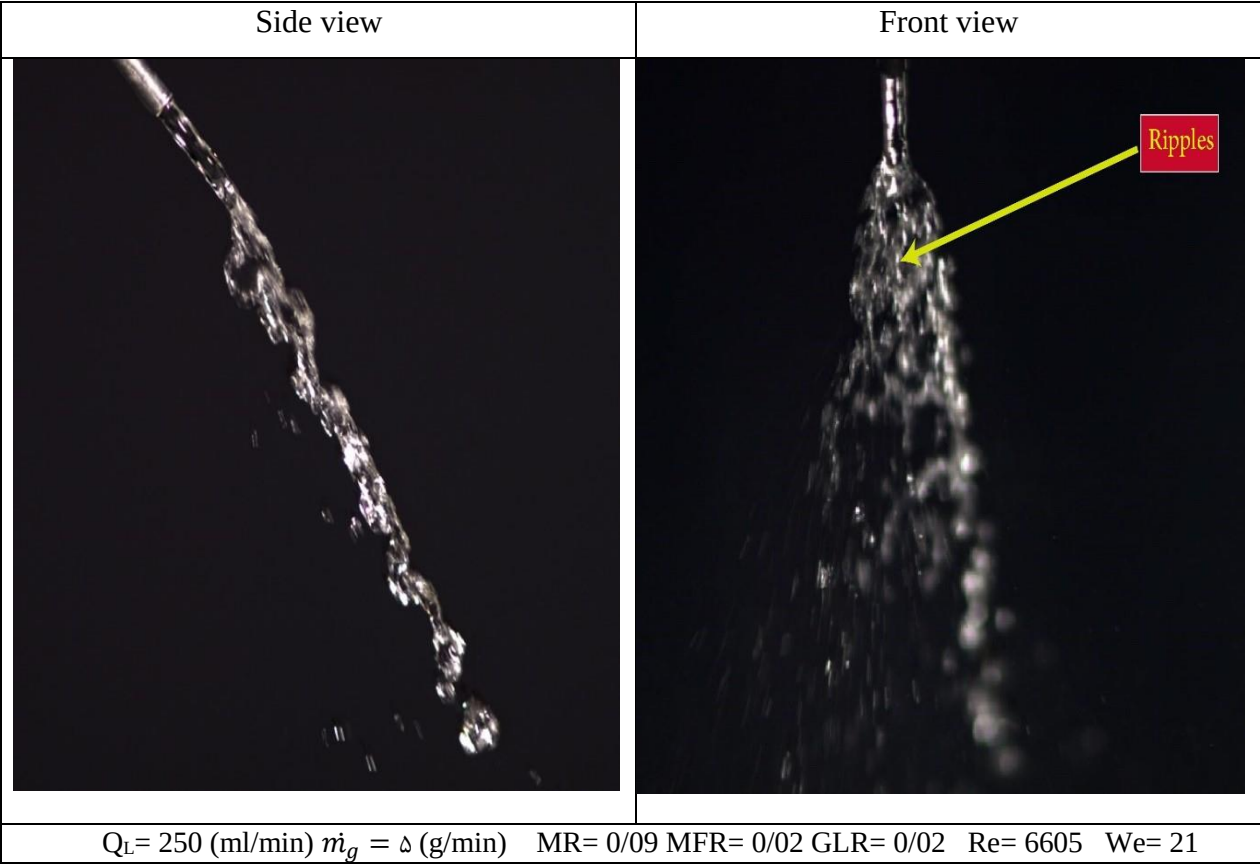


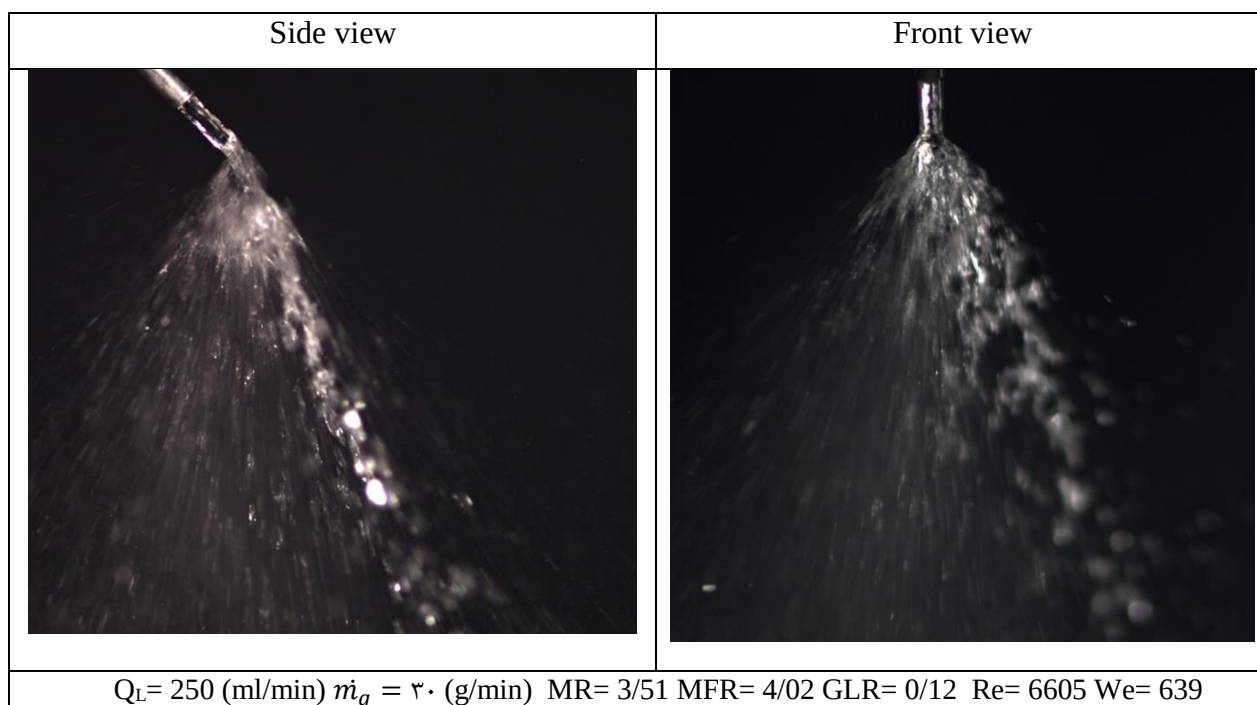
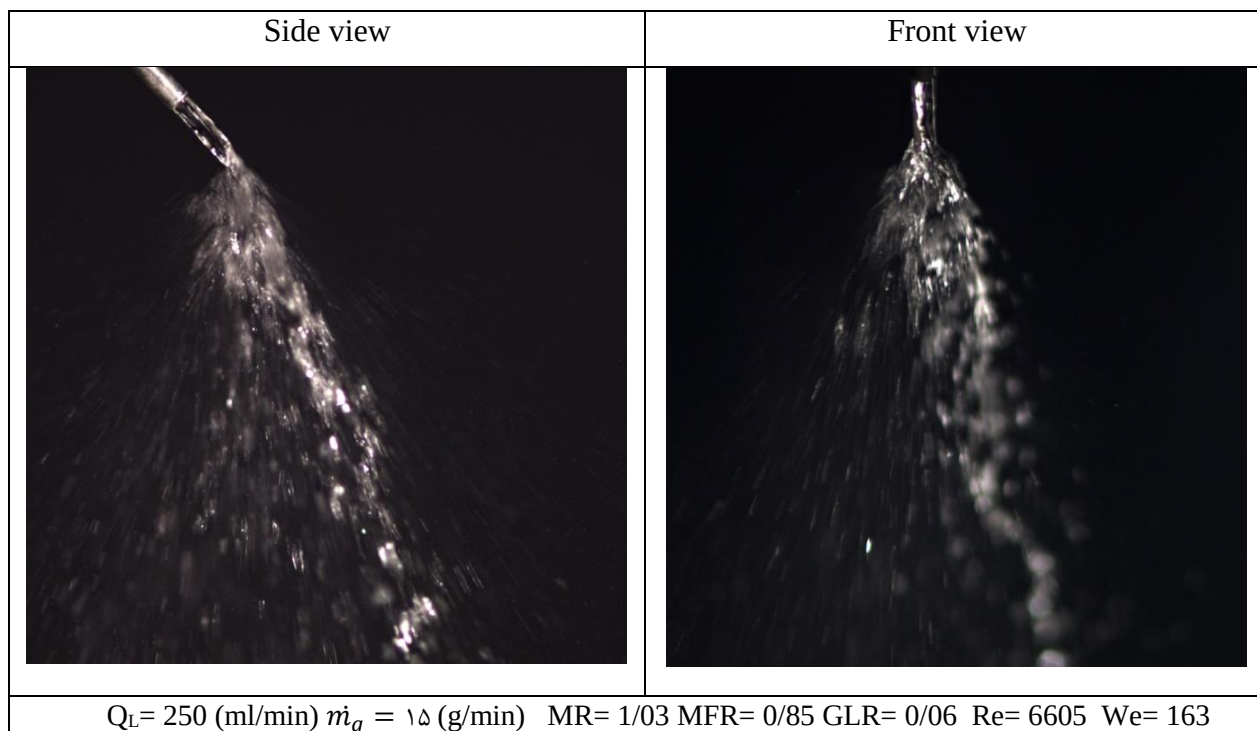












شکل ۴-۴- ساختار میدان جریان جت آب در شدت جریان‌های مختلف در زاویه ۴۵ درجه نمای رو به رو-نمای کناری

۴-۴- طول فروپاشی جت

طول فروپاشی جت مایع برای توسعه و پیش‌بینی رفتار پاشش در کاربردهای صنعتی مهم و ضروری است، به این دلیل که کشش آیرودینامیکی برای جت مایع و قطرات متفاوت است. طول فروپاشی در شکل ۴-۵ و شکل ۴-۶ از نمای روبه‌رو و نمای کناری نشان داده شده است که در فاصله نقطه برخورد هندسی تا موقعیتی که تعریف می‌شود، صفحه جت آب در آن ناپیوسته می‌شود یا به‌طور کامل شکسته نشده باشد. جت‌های برخوردی آب در هوا با توجه به سرعت هوا و عدد وبری که دارند با مدل‌های مختلفی دچار فروپاشی می‌شوند. رژیم‌های فروپاشی عمدتاً توسط عدد وبر کنترل می‌شوند. در شکل ۴-۵، پس از تزریق جت هوا به درون جت آب، جت هوا به درون جریان جت آب نفوذ کرده و جریان هوا باعث به وجود آمدن امواج بر سطح صفحه جت آب تزریق شده می‌شود. این امواج منجر به ایجاد ناپایداری هیدرودینامیکی جت آب می‌شود که در نهایت به فروپاشی می‌رسد. به علت افزایش ناپایداری که در طول صفحه آب اتفاق می‌افتد، صفحه آب شروع به ناپایدار شدن می‌کند و در نهایت به لیگامنت‌ها شکسته می‌شوند که به فروپاشی کیسه‌ای^۱ معروف است. فروپاشی جت آب به لیگامنت‌ها اولین مرحله در فروپاشی صفحه جت آب بوده و به آن رژیم فروپاشی کیسه‌ای گفته می‌شود؛ در نهایت، رشته‌های جدا شده لیگامنت از صفحه آب در طول مسیر تحت تأثیر فروپاشی ثانویه به قطرات ریز تبدیل می‌شود. همان‌طور که پیش از این گفته شد، دو نوع فرآیند فروپاشی برای جت آب در این پژوهش وجود دارد که به فروپاشی کیسه‌ای و فروپاشی فیبر معروف‌اند. آب به‌صورت پیوسته بین خروجی انژکتور و نقطه فروپاشی شکل می‌گیرد. دانستن محل فروپاشی برای مدل‌سازی جت آب در جریان هوا واجب است که البته به‌دست آوردن محل دقیق آن برای وجود قطرات با چگالی زیاد کار سختی است. برای به‌دست آوردن طول فروپاشی باید در چند نسبت تکانه، از جمله نسبت تکانه هوا به آب، نسبت شار تکانه هوا به آب، نسبت انرژی هوا به آب و عدد وبر برای یک انژکتور،

^۱Bag Breakup

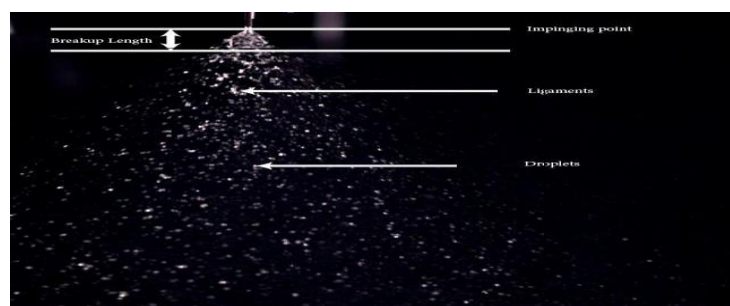
مختصات فروپاشی در نقطه برخورد را مشخص نمود و سپس روابط مربوط را به دست آورد؛ به طور کلی ماهیت واکنش برخورد جریان جت های هوا و آب به شدت ناپایدار است. در سه رژیم فروپاشی اصلی برای متمیزه شدن جت های هم محور گاز مورد استفاده قرار می گیرد. این رژیم های فروپاشی شامل فروپاشی نوع رایلی، فروپاشی نوع کیسه ای و فروپاشی نوع فیبر هستند. در این مطالعه فروپاشی، فروپاشی غالب، فروپاشی کیسه ای و فروپاشی فیبر است. دسته بندی محدوده فروپاشی های موجود برای صفحه جت آب براساس عدد وبر بیان شده است:

(۱) رژیم فروپاشی مدل رایلی $We < 20$

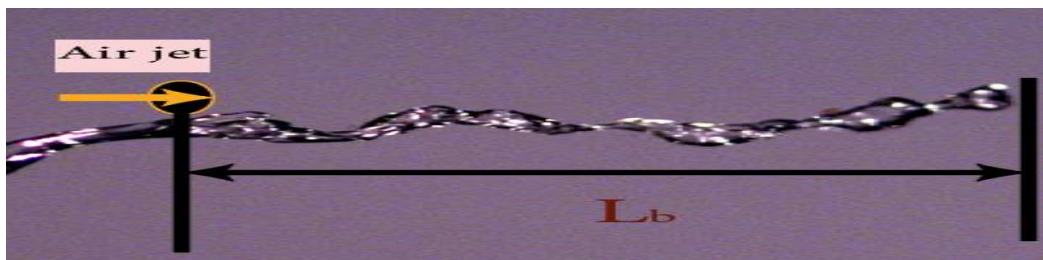
(۲) رژیم فروپاشی مدل کیسه ای $20 < We < 80$

(۳) رژیم فروپاشی مدل فیبر $We > 80$

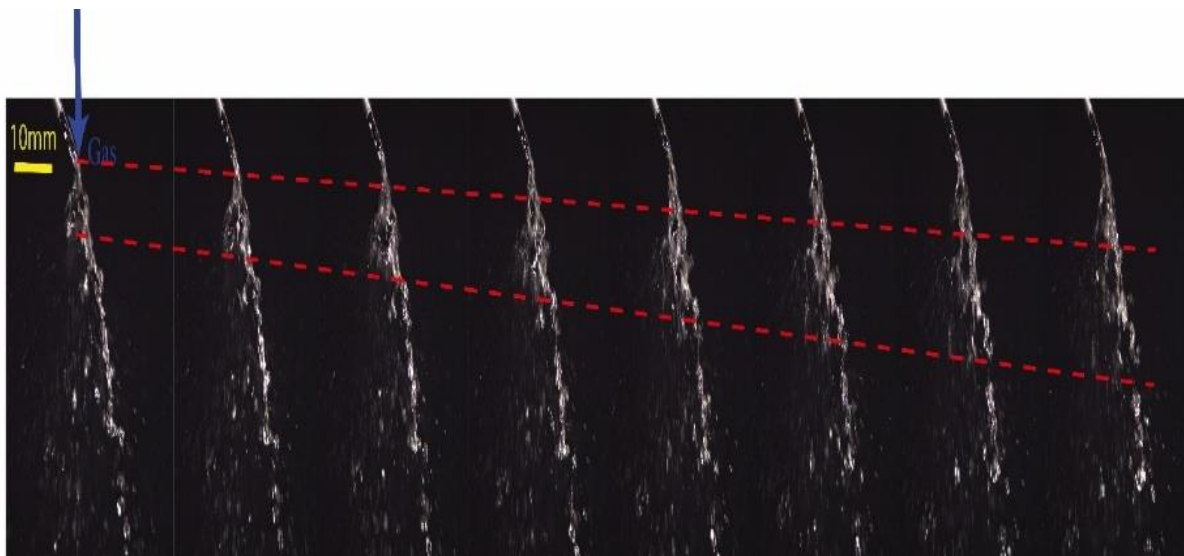
همان طور که مشاهده می شود با افزایش عدد وبر، رژیم های فروپاشی تغییر می کند. تغییرات عدد وبر تأثیر زیادی نسبت به تغییرات نسبت تکانه دارد که در آن نرخ جریان هوا به آب بر روی نوع فروپاشی تأثیر دارد. یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر صفحه جت آب که نقش اساسی در طول فروپاشی دارد، تأثیر نسبت تکانه نرخ جریان هوا به آب است. نقطه آغاز این ناحیه را نقطه فروپاشی صفحه جت آب می نامیم. فروپاشی جت به دلیل ماهیت بسیار غیر یکنواخت آن در یک نقطه ثابت رخ نمی دهد. به همین دلیل در این پژوهش، محل فروپاشی صفحه آب به طور میانگین شروع محل تشکیل لیگامنت ها در نظر می گیریم که از صفحه جت آب جدا می شوند.



شکل ۴-۵- نمای روبه رو پاشش به همراه اندازه طول فروپاشی



شکل ۴-۶- اندازه طول فروپاشی جت آب در نمای کناری



شکل ۴-۷- تکامل زمانی نفوذ جت هوا به یک جت آب و تشکیل فروپاشی

شکل ۴-۷ تکامل زمانی فروپاشی جت آب برای ۵۰ میلی لیتر بر دقیقه و شدت جریان جرمی ۵ گرم بر دقیقه را نشان می‌دهد. نفوذ هوا با یک جت آب در عدد وبر ۲۱ با تکامل زمانی ۰/۲۵ میلی ثانیه از چپ به راست صفحه X-Z صورت می‌گیرد. در این حالت می‌توان بعد از تشکیل صفحه آب و فروپاشی این صفحه باعث به وجود آمدن کیسه ی آب و فروپاشی آن می‌شود، مشاهده کرد. در منطقه‌ای که توسط رنگ آبی نشان داده شده‌است، جت آب به دلیل تأثیر شدت هوا در نقطه برخورد دو جت به شدت تغییر شکل می‌دهد. این تغییر شکل باعث جدا شدن قطرات درشت از آن می‌شود؛ پس از عکس‌برداری از پدیده فروپاشی در حالات مختلف، تصاویر ثبت شده باید مورد پردازش قرار بگیرند تا امکان به دست آوردن اندازه طول فروپاشی مورد نیاز فراهم شود. پردازش تصویر در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول ابعاد فیزیکی یک پیکسل از هر تصویر باید مشخص شود. ما برای به دست آوردن اندازه طول فروپاشی با توجه به داشتن ابعاد قطر

انژکتور تعداد پیکسل آن را مشخص نموده‌ایم. در مرحله دوم پردازش تصویر، عکس خام پدیده فروپاشی جت آب دریافت می‌شود و در اولین مسیر، فروپاشی جت آب شناسایی شده و مرز سایه‌های آن از تصاویر پس‌زمینه، جدا می‌شود که در گام آخر پروفیل فروپاشی جت آب مشخص می‌شود. در آخر به کمک بعد فیزیکی به‌دست آمده در مرحله اول پردازش تصویر، تعداد پیکسل به‌دست آمده برای هر پارامتر به طول فیزیکی بر حسب میلی‌متر تبدیل می‌شود. فرآیند پردازش تصویر در شکل ۴-۷ آورده شده است. ساختار پاشش و نحوه برخورد جت‌های آب و هوا با یکدیگر از توالی‌های زمانی عکاسی لحظه‌ای مشاهده شد. متوسط طول فروپاشی جت آب با استفاده از ۲۰ فریم متوالی با دامنه عمومی، برنامه پردازش تصویر مبتنی بر جاوا، توسط برنامه دیجی مایزر اندازه گیری شدند.



شکل ۴-۸- فرآیند پردازش تصویر فرآیند فروپاشی جت آب

برای داشتن یک نمای کلی از فرآیندهای فروپاشی و اتمیزاسیون‌های مختلف که در محدوده وسیعی از شرایط آب و هوا رخ می‌دهد، ایجاد یک نمودار رژیم مشابه برای انژکتورهای جت برخوردی مفید است. نمودار هاپفینگر در سال ۱۹۹۸ در شکل ۱-۱۱ به‌صورت رژیم‌های مختلف فروپاشی در فضای پارامتر عدد رینولدز آب-عدد وبر آیرودینامیکی گاز ارائه شده‌اند که برای شناسایی رژیم‌های فروپاشی به‌دست آمده در

این تحقیق مورد استفاده، قرار گرفته است [۴۰]. نمودار پیشنهادی آقای هاپفینگر [۴۰] برای جریان گاز هم‌محور مورد استفاده، قرار گرفته است. طبقه‌بندی ساختار شناسی فروپاشی جت‌های آب احاطه‌شده، توسط جریان گاز هم‌محور بیش‌تر برای تعیین کمیت مشخصات پاشش انژکتورهای برخوردی استفاده می‌شود. اتمیزه شدن با کیفیت، به معنای پاشش با قطرات یکنواخت کوچک و بسیار ریز، در نزدیکی مرز بالایی فروپاشی فیبر به‌دست می‌آید. هرچه وبر سمت راست یا بالا، دورتر در شکل ۴-۹ ارائه‌شده باشد، کیفیت پاشش بهتر است؛ به‌طور کلی فروپاشی جت‌های آب می‌تواند به‌عنوان تابعی از عدد وبر گازی بیان شود.

در سه رژیم فروپاشی اصلی برای اتمیزه شدن جت‌های هم‌محور گاز بیان شده است. این رژیم‌های فروپاشی شامل فروپاشی نوع رایلی، فروپاشی نوع کیسه‌ای و فروپاشی نوع فیبر هستند. فروپاشی جت آب در این مطالعه، فروپاشی غالب فروپاشی کیسه‌ای و فروپاشی فیبر است.

(۱) رژیم فروپاشی مدل رایلی $We < 20$

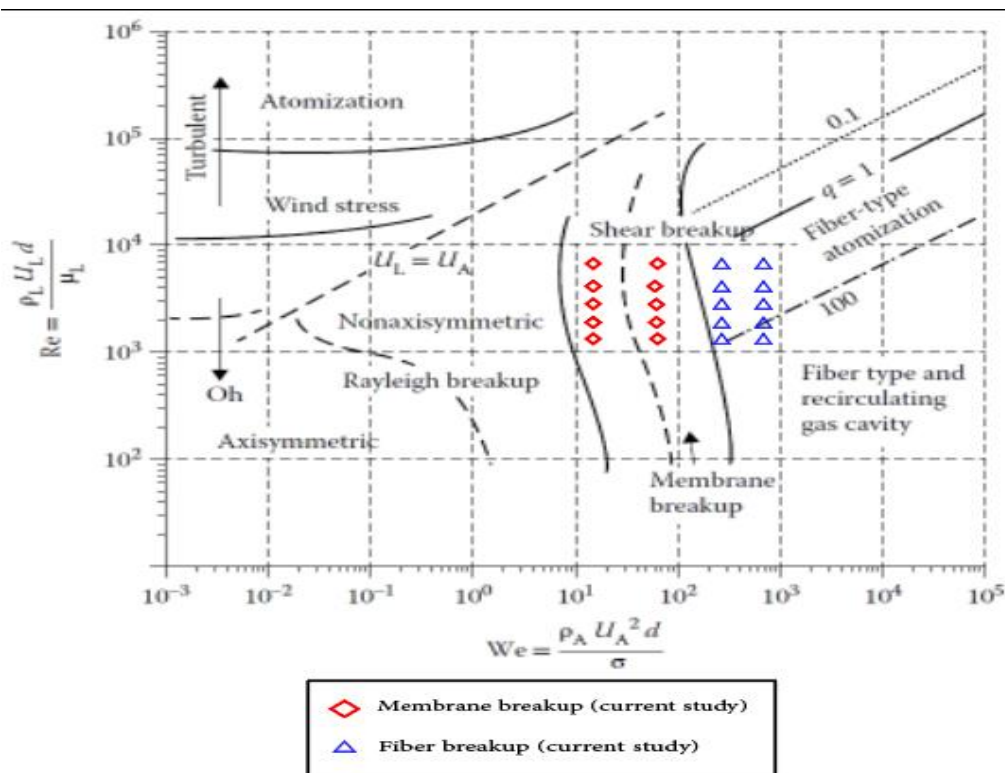
(۲) رژیم فروپاشی مدل کیسه‌ای $20 < We < 80$

(۳) رژیم فروپاشی مدل فیبر $We > 80$

نمودار رژیم فروپاشی در شکل ۴-۹ نشان داده شده است. در این پژوهش عدد وبر بین ۲۱-۶۳۹ و عدد رینولدز بین ۱۳۲۱-۶۶۰۵ است. در این پژوهش دو نوع فروپاشی بررسی شده برای جت آب از نوع فروپاشی مدل کیسه‌ای برای اعداد وبر بین ۲۰ و ۸۰ و فروپاشی مدل فیبر برای اعداد وبر بالای ۸۰ هست. برای فروپاشی کیسه‌ای^۱ عدد رینولدز بین ۱ تا ۱۰۰۰۰ و عدد وبر باید بین عدد ۱۰ و ۸۰ باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این مطالعه، عدد وبر دو حالت اول تست، عدد وبر دو حالت اول تست با توجه به‌شدت جریان جرمی‌های ۵ و ۱۰ گرم بر دقیقه، عدد ۲۱ و ۶۹ است و در نتیجه عدد رینولدزهای به‌دست آمده هم در بازه

^۱ Membrane breakup

موردنظر است. برای فروپاشی فیبر^۱ عدد رینولدز بین ۱ تا ۱۰۰۰۰ و عدد وبر باید بین عدد ۱۰۰ و ۱۰۰۰ باشد. باتوجه به نتایج بهدست آمده در این مطالعه، عدد وبر دو حالت اول تست، با توجه به شدت جریان جرمی‌های ۱۵ و ۳۰ گرم بر دقیقه، عدد ۱۶۳ و ۶۳۹ است و در نتیجه، عدد رینولدزهای بهدست آمده هم در بازه مورد نظر هست. در نقطه برخورد دو جت برای هر شدت جریان حجمی آب ثابت، عدد وبر متفاوت با توجه به سرعت جریان هوا بهدست می‌آید. با افزایش عدد وبر از ۲۱ تا ۶۳۹ نقطه برخورد دو جت بسیار آشفته‌تر خواهد شد. طول فروپاشی جت آب در حالت عدد وبر ۶۳۹ در کمترین مقدار خود قرار دارد. اتمیزاسیون حاضر توسط رژیم‌های مشخص‌شده در مطالعه حاضر با استفاده از آب انجام‌شده است [۴۰]. هرچه عدد رینولدز بهدست آمده به سمت بالای نمودار و همچنین عدد وبر به سمت راست نمودار باشد باعث بهبود کیفیت اتمیزاسیون می‌شود.

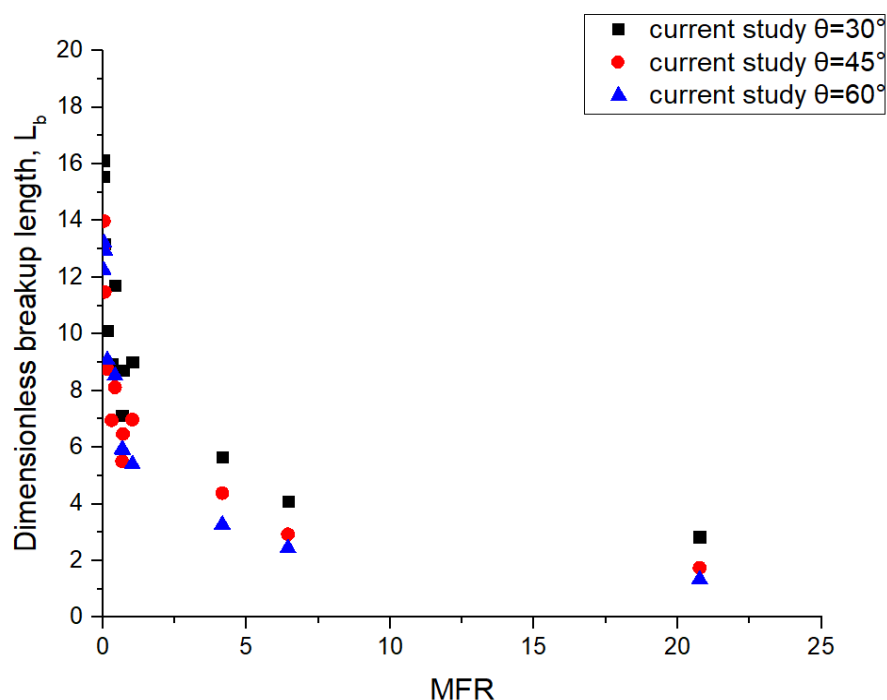


شکل ۹-۴- رژیم‌های فروپاشی مایع در جریان گاز در فضای پارامتر $Re-We$ [۴۰]

^۱ Fiber breakup

شکل ۴-۱۰ طول فروپاشی را برای حالت‌های برخورد جت با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به عنوان تابعی از نسبت شار تکانه هوا به آب (MFR) نشان می‌دهد. برای هر سه زاویه برخورد مقادیر MFR برای شدت جریان‌های مختلف یکسان است. برای مقادیر نسبت شار تکانه هوا به آب کمتر از یک ($MFR < 1$)، طول فروپاشی بدون بعد از مقدار حداکثر خود یعنی عدد ۱۶ به مقدار زیادی کاهش پیدا می‌کند و سپس به مقدار ثابتی برای نسبت شار تکانه هوا به آب بزرگ‌تر از ۱ میل می‌کند. بیش‌ترین طول فروپاشی بدون بعد برای زاویه ۳۰ درجه می‌باشد. به طور کلی در حالت شدت جریان آب ثابت، هرچه مقدار شدت جریان جرمی هوا بیش‌تر باشد، طول فروپاشی در هر مرحله کاهش پیدا می‌کند. با افزایش سرعت هوا در اثر افزایش شدت جریان جرمی هوا از ۵ تا ۳۰ گرم بر دقیقه، مقدار پارامتر MFR زیاد می‌شود. MFR بالاتر به معنی سرعت محوری نسبتاً بزرگ‌تر جت هوا نسبت به جت آب است که طول فروپاشی را کاهش می‌دهد. یعنی اندازه پارامتر MFR، نه تنها سرعت بین هوا و آب بلکه الگوهای پاشش جت‌های برخوردی را تعیین می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود اثر زاویه برخورد در مقادیر نسبت شار تکانه هوا به آب کمتر از یک در نتایج حاصل از زاویه ۴۵ و ۶۰ درجه قابل چشم پوشی می‌باشد. نتایج زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه برای مقادیر نسبت شار تکانه هوا به آب حدود یک بسیار بهم تشابه دارند. همان‌طور می‌شود که در MFR بیش‌تر از ۲/۵ طول فروپاشی زاویه ۳۰ درجه بیش‌تر زاویه ۴۵ و ۶۰ درجه می‌شود. افزایش زاویه برخورد دو جت هوا و آب از ۳۰ درجه به ۶۰ درجه منجر به کاهش طول فروپاشی می‌شود. می‌توانیم نتیجه‌گیری کنیم که برای مقادیر MFR بزرگ‌تر از ۱ طول فروپاشی در مراحل مختلف کاهش پیدا می‌کند پس می‌توان انتظار داشت که این نتیجه‌گیری منجر به بهبود کیفیت اتمیزاسیون با قطرات بسیار ریز می‌شود. با توجه زاویه برخورد دو جت، طول فروپاشی در مقادیر MFR بزرگ‌تر از ۲/۵ در زاویه ۳۰ درجه بزرگ‌تر از زاویه ۴۵ و ۶۰ درجه می‌باشد. پس می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کیفیت اتمیزاسیون در زاویه ۶۰ درجه نسبت به زاویه ۳۰ و ۴۵ درجه مقداری بهتر می‌باشد. این نشان می‌دهد که فیزیک فرآیند طول فروپاشی جت آب به شدت تحت تأثیر زاویه برخورد جت هوا-آب قرار نمی‌گیرد.

به‌طور کلی، همه همبستگی‌ها در همه زوایا از یک روند مشابه نزولی پیروی می‌کنند، یعنی طول فروپاشی بدون‌بعد به شدت برای مقادیر بالا نسبت شار تکانه هوا به آب کاهش می‌یابد و سپس طول فروپاشی به سمت یک مقدار بیش‌تر از $MFR > 1$ میل می‌کند، که همزمان با شرایطی است که جت هوا به‌طور کامل باعث فروپاشی جت‌های آب می‌شود و وابستگی آن‌ها نسبت به جت‌های آب کاهش می‌یابد. در شدت‌جریان هوا ۳۰ گرم بر دقیقه و شدت حجمی ۵۰-۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه کوچک‌ترین طول فروپاشی را در هر مرحله شاهد هستیم. عدم قطعیت در واحدهای اندازه‌گیری اصلی برای اندازه طول فروپاشی در حدود ۶/۲۵٪ می‌باشد. عدم قطعیت نسبی عدم قطعیت را به عنوان درصدی از مقدار اصلی می‌دهد.

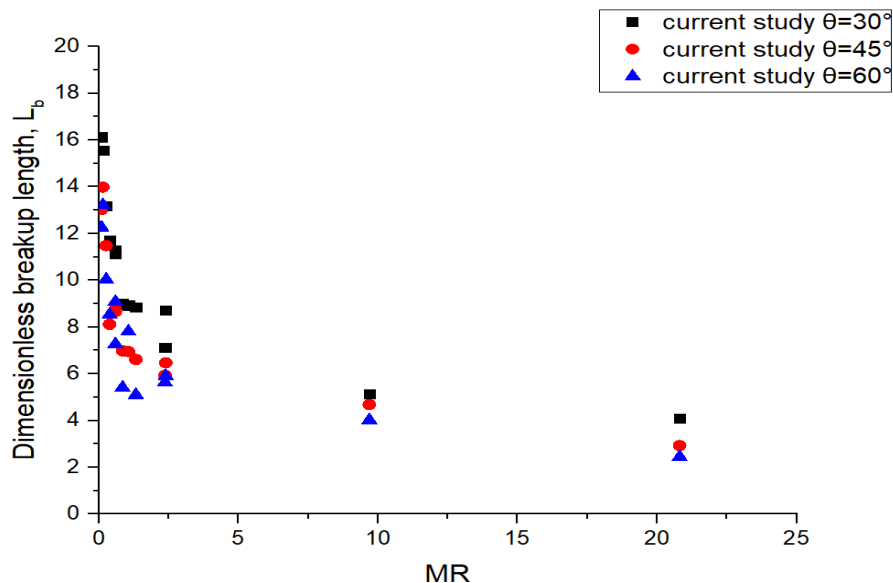


شکل ۴-۱۰- مقایسه اندازه طول فروپاشی بدون‌بعد بر حسب پارامتر MFR در سه زاویه برخورد مختلف

شکل ۴-۱۱ طول فروپاشی را نشان می‌دهد که با قطرانژکتور جت آب بدون‌بعد شده است و تابعی از پارامتر MR تعریف‌شده در معادله (۴-۴) است. از مهم‌ترین پارامترها بر صفحه جت آب در طول فروپاشی

آن دارد، اثر نسبت تکانه هوا به آب است. این امر دارای مزیت مقیاس گذاری بهتر نتایج نسبت به عدد وبر است، زیرا ما نمی توانیم اثر تغییر سرعت آب را به دلیل تغییرات کوچک اختلاف سرعت نسبی بین جریان های گاز و آب وقتی که نرخ جریان آب تغییر می کند، آشکار کنیم. نسبت تکانه هوا به آب تعریف شده در معادله (۴-۴) برتری این پارامتر نسبت به عدد وبر هست که شامل تأثیر ابعاد خروجی انژکتور نیست. در نظر گرفتن این که میانگین طول فروپاشی بدون بعد در محدوده ۱۶ تا ۲/۵ تغییر می کند که بسته به شرایط شدت جریان برای محدوده MR بالا، که در آن میانگین طول فروپاشی بدون بعد کوتاه تر است. برای مقادیر پایین تر MR، اتمیزه شدن شدت کمتری دارد.

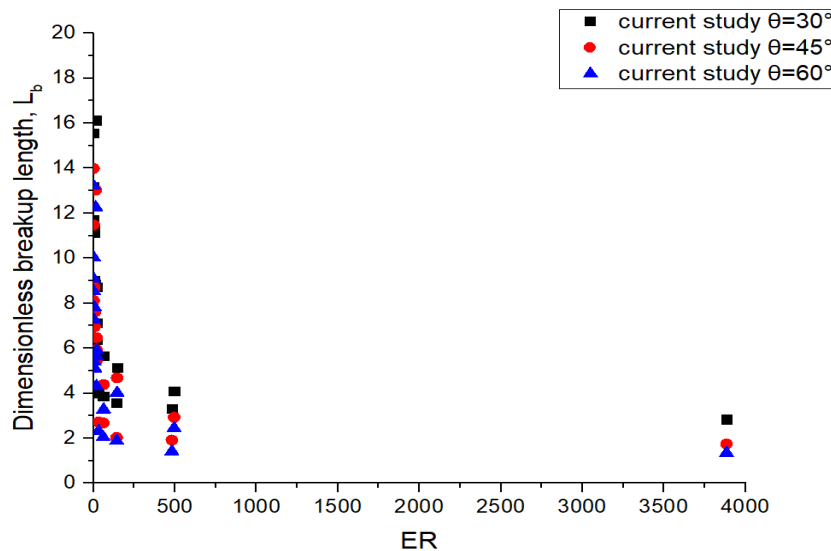
همان طور که در شکل ۴-۱۱ مشاهده می شود مقدار حداکثر طول فروپاشی عدد ۱۶ در زاویه ۳۰ درجه است. کاهش نرخ سرعت طول فروپاشی کم می شود و طول فروپاشی برای MR از ۳ تا ۲۱ نسبتاً ثابت باقی می ماند. اندازه طول فروپاشی با افزایش پارامتر MR در زاویه ۳۰ درجه از عدد یک به ۲۱ با سرعت زیاد حدود عدد ۱۶ به عدد ۳/۳۲ می رسد. اندازه طول فروپاشی با افزایش پارامتر MR در زاویه ۴۵ درجه از عدد یک به ۲۱ با سرعت زیاد حدود عدد ۱۴ به عدد ۱/۹۷ می رسد. اندازه طول فروپاشی با افزایش پارامتر MR در زاویه ۶۰ درجه از عدد یک به ۲۱ با سرعت زیاد حدود عدد ۱۴ به عدد ۱/۴۲ می رسد. در مقدار حداقل طول فروپاشی در MR عدد ۲۱، در زاویه ۳۰ درجه، حدود ۱/۶ برابر زاویه ۴۵ و ۲/۳۳ برابر زاویه ۶۰ درجه است. نتایج طول فروپاشی در MR ۳ تا ۲۱ در زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه نزدیک به هم هستند. افزایش زاویه برخورد دو جت آب از ۳۰ درجه به ۶۰ درجه، منجر به کاهش طول فروپاشی می شود که به دلیل افزایش سرعت هوای تزریق شده به جت آب برای زاویه برخورد بزرگ تر و همچنین افزایش رفتار انتقال انرژی از هوا به جریان آب است. نتایج نشان می دهد که طول فروپاشی جت آب به طور قابل توجهی برای دامنه MR بین ۱ و ۵ تغییر می کند؛ بنابراین، تغییر قابل توجهی در تعامل بین هوا و جت آب در داخل وجود دارد.



شکل ۴-۱۱- مقایسه اندازه طول فروپاشی بدون بعد بر حسب پارامتر MR در سه زاویه برخورد مختلف

شکل ۴-۱۲ طول فروپاشی را نشان می‌دهد که با قطر انژکتور جت آب بدون بعد شده است و تابعی از ER تعریف شده در معادله (۴-۵) است. با افزایش شدت جریان حجمی آب و شدت جریان جرمی هوا منجر به افزایش سرعت هوا و آب می‌شود. این افزایش سرعت هوا و آب افزایش پارامتر ER خواهد شد. مقدار طول فروپاشی با افزایش شدت جریان جرمی جریان هوا، کاهش پیدا می‌کند؛ زیرا جریان هوا مقدار تکانه و انرژی لازم برای فروپاشی جت آب در نقطه برخورد فراهم می‌کند؛ پس با توجه به این تفاسیر می‌توان نتیجه گرفت که در زاویه ۶۰ درجه هرچه شدت جریان جرمی هوا افزایش بیابد طول فروپاشی کوچک‌تر شده و انرژی بین دو جت افزایش می‌یابد. اثر زاویه برخورد در این موضوع انرژی بین دو جت نقش پررنگی ایفا می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در زاویه ۳۰ درجه نسبت به زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه، طول فروپاشی بزرگ‌تری شاهد هستیم. برای انجام کامل فرآیند اتمیزاسیون در نقطه برخورد ما نیازمند این هستیم که جت هوا انرژی مورد نیاز برای فروپاشی جت آب را داشته باشد. علت فروپاشی جت آب، تغییر انرژی بین دو جت آب و هوا است. با افزایش شدت جرمی هوا در نقطه برخورد ما شاهد افزایش تبادل انرژی و ناپایداری‌های بین دو جت هستیم. در $ER < 10$ ما شاهد بیش‌ترین طول فروپاشی در هر سه زاویه برخورد

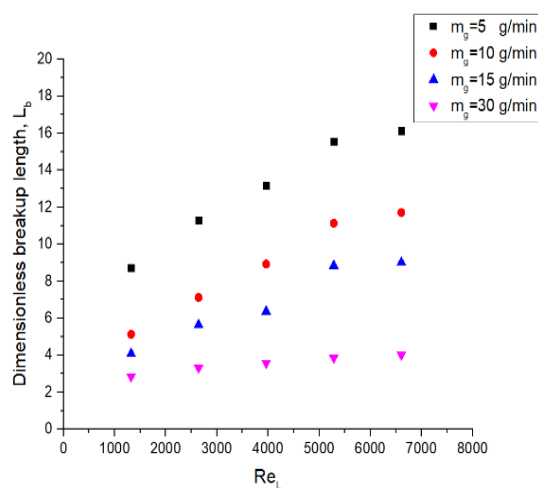
هستیم؛ زیرا تبادل انرژی بین دو جت در این حالت در کمترین حالت ممکن است. با افزایش پارامتر ER به نزدیکی عدد ۵۰۰ طول فروپاشی جت آب به طور محسوس کاهش پیدا می کند.



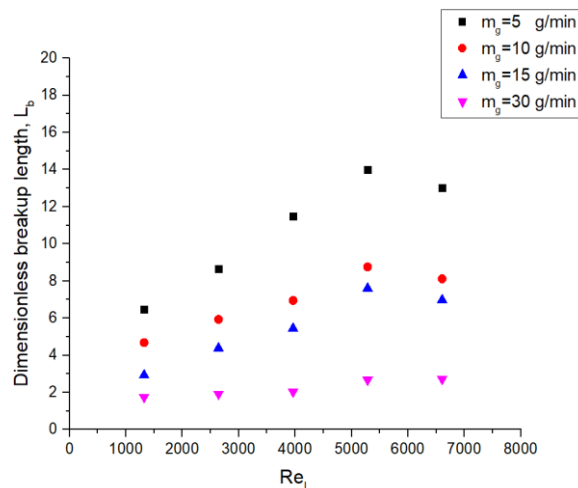
شکل ۴-۱۲- مقایسه اندازه طول فروپاشی بدون بعد بر حسب پارامتر ER در سه زاویه برخورد مختلف

اثر شدت جریان جرمی هوا بر حسب طول فروپاشی در شرایط مختلف بررسی شده است. طول فروپاشی آب برای شدت جریان های مختلف هوا و آب طبق شکل ۴-۱۳ با قطر جت آب بدون بعد می شود، نشان می دهد با افزایش شدت جریان آب از ۵۰ تا ۲۵۰ میلی لیتر بر دقیقه و در نتیجه، افزایش سرعت آب باعث افزایش عدد رینولدز می شود. با افزایش تعداد عدد رینولدز، طول فروپاشی افزایش پیدا می کند. مشاهده می شود که عدد رینولدز آب با نرخ جریان هوا افزایش می یابد و همچنین به صورت خطی با نرخ شدت جریان آب افزایش می یابد. طول فروپاشی به صورت فاصله از نقطه برخورد تا نقطه ای تعریف می شود که در آن پیوستگی جت آب می شکند. طول فروپاشی با تقسیم قطر روزنه جت آب بدون بعد می شود. تغییرات طول فروپاشی بدون بعد با عدد رینولدز جت آب در سرعت های مختلف جریان هوا و زوایای برخورد مختلف رسم و در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است. در سرعت های پایین جت آب، ناپایداری های ایجاد شده، توسط نیروی جت به اندازه کافی برای فروپاشی صفحه آب قوی نیستند. افزایش سرعت آب، مساحت صفحه جت را به دلیل نرخ جریان آب بالاتر و در نتیجه طول فروپاشی، افزایش می دهد. با افزایش بیش تر سرعت جت آب، طول

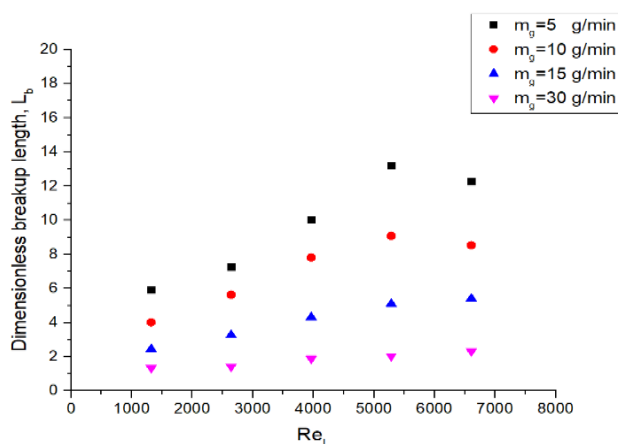
فروپاشی شروع به کاهش می‌کند؛ زیرا ناپایداری‌های ایجادشده توسط ضربه به‌اندازه کافی قوی هستند که صفحه جت آب را بشکند. همان‌طور که در شکل ۴-۱۳ مشاهده می‌شود که در زاویه ۴۵ و ۶۰ درجه در عدد رینولدز ۶۶۰۵ در شدت جریان جرمی‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ گرم بر دقیقه طول فروپاشی نسبت به عدد رینولدز کاهش پیدا می‌کند. در زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه نتایج نسبتاً مشابهی درباره طول فروپاشی می‌باشد؛ به‌طور کلی، برای تمام زوایای برخورد، اثر هوا در سرعت‌های پایین جت آب بالاتر است و با افزایش سرعت کاهش می‌یابد.



الف) زاویه ۳۰ درجه



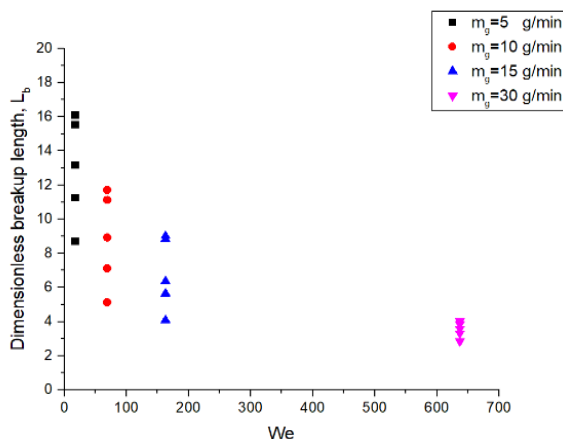
ب) زاویه ۴۵ درجه



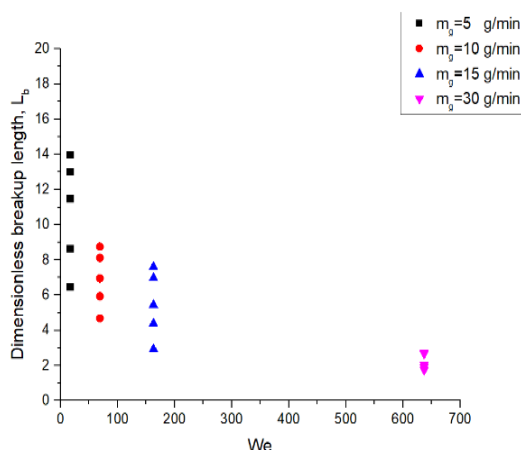
ج) زاویه ۶۰ درجه

شکل ۴-۱۳- طول فروپاشی بدون بعد بر حسب عدد رینولدز در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه

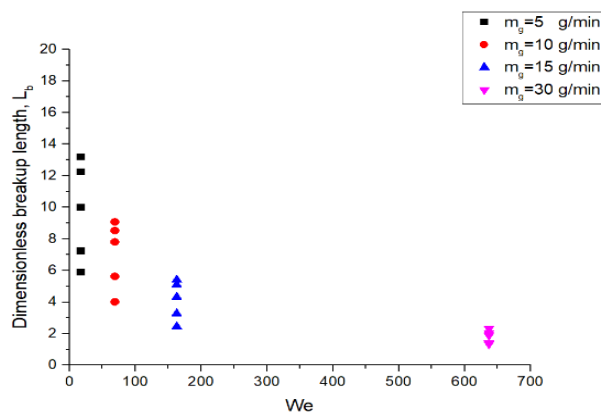
طول فروپاشی آب برای شدت جریان‌های مختلف هوا و آب طبق شکل ۴-۱۴ با قطر جت آب بدون بعد می‌شود، نشان می‌دهد با افزایش شدت جریان جرمی هوا از ۵ به ۳۰ گرم بر دقیقه و در نتیجه افزایش سرعت هوا باعث افزایش عدد وبر می‌شود. همان‌طور که ملاحظه با افزایش عدد وبر که نشان‌دهنده برتری نیروهای اینرسی بر نیروهای کشش سطحی آب است، همچنین با افزایش عدد وبر مقدار ضخامت صفحه جت آب تشکیل‌شده کاهش پیدا کرده و در نتیجه فروپاشی جت آب راحت‌تر انجام می‌گیرد. این نتیجه‌گیری نشان می‌دهد که افزایش اثرات آیرودینامیکی جریان هوا باعث تشدید ناپایداری‌های جریان آب و در نتیجه، فروپاشی سریع‌تر آن می‌شود. با افزایش تعداد عدد وبر، طول فروپاشی کاهش پیدا می‌کند. هرچه شدت جریان جرمی هوا افزایش پیدا کند باعث زیاد شدن سرعت هوا می‌شود؛ در نتیجه باعث بهبود کیفیت اتمیزاسیون می‌شود. جت هوا با عدد وبر بزرگ‌تر منجر به اتمیزاسیون بهتر می‌شود. عدد وبر رابطه مستقیمی با سرعت هوا در نقطه برخورد دو جت هوا و آب دارد. کاهش طول فروپاشی البته خطی نیست بلکه در ابتدا با شیب تندی کم شده و سپس با افزایش شدت جریان جرمی هوا (وبر هوا) شیب طول فروپاشی جت آب کاهش می‌یابد. این پدیده به این علت رخ می‌دهد که هرچه سرعت هوا در نقطه برخورد دو جت بیش‌تر باشد، نیروی درگ بیش‌تر به جت آب وارد می‌کند و در نتیجه جت آب زودتر منحرف می‌شود و در نتیجه، طول فروپاشی آن نیز کمتر می‌شود. به دلیل بالا رفتن عدد وبر، آشفتگی‌های جریان و ناپایداری‌های ظاهر شده بر جت آب افزایش می‌یابند. این ناپایداری‌ها نقش اساسی در فروپاشی جت آب دارند و چون اساساً نابسامان هستند، موجب افزایش نوسانات طول فروپاشی می‌شوند.



الف) زاویه ۳۰ درجه



ب) زاویه ۴۵ درجه

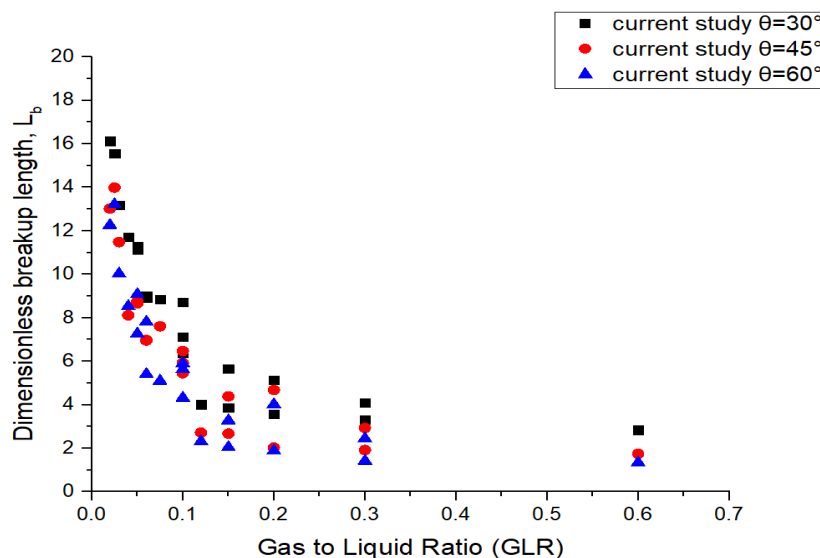


ج) زاویه ۶۰ درجه

شکل ۴-۱۳ طول فروپاشی بدون بعد بر حسب عدد وبر در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه

شکل ۴-۱۵ مقایسه نتایج تجربی برای طول فروپاشی صفحه آب برای نسبت‌های هوا به آب مختلف را نشان می‌دهد. علاوه بر این، روند تغییرات طول فروپاشی برای همه آن‌ها یکسان است. به علت افزایش اختلاف سرعت بین دو فاز هوا و آب ناپایداری در نقطه برخورد افزایش پیدا می‌کند و این مسئله باعث کاهش طول فروپاشی جت آب می‌شود. در زوایای برخورد ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه کوچک‌ترین طول فروپاشی در GLR مقدار ۰/۶ مشاهده می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده نقش بسیار پررنگ سرعت هوا در ناپایداری‌ها و کاهش طول فروپاشی دلالت دارد. برای سرعت آب یکسان، افزایش سرعت هوا در نقطه برخورد باعث افزایش ناپایداری‌ها، در نتیجه نوسانات کوچک ایجاد شده در نقطه برخورد سریع‌تر تقویت می‌شود. مقدار

طول فروپاشی با افزایش شدت جریان جرمی جریان هوا، کاهش پیدا می‌کند؛ زیرا جریان هوا مقدار تکانه و انرژی لازم برای فروپاشی جت آب در نقطه، برخورد فراهم می‌کند.



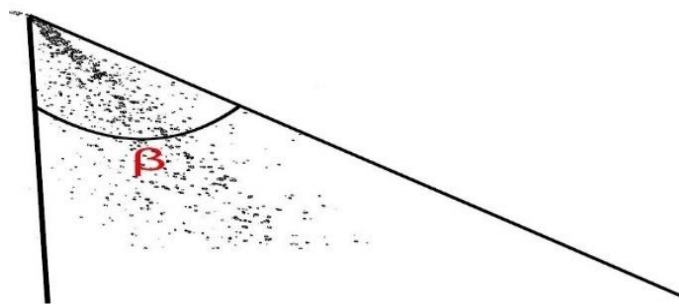
شکل ۴-۱۵- طول فروپاشی بدون بعد بر حسب پارامتر GLR در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه

۴-۵- زاویه پاشش

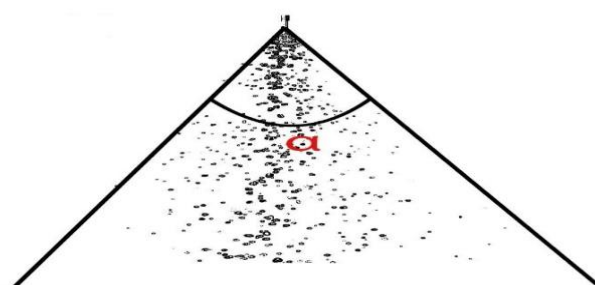
زاویه پاشش به عنوان زاویه بین دو مرز منطقه اشغال شده، توسط پاشش تولید شده از اتمیزاسیون جت‌های برخوردی تعریف می‌شود. زاویه تشکیل شده، بعد از برخورد دو جت توسط دو خط مستقیم کشیده شده از روزنه تخلیه انژکتور برای کانتورهای پاشش در یک فاصله خاص مشخص می‌شود. زاویه پاشش اهمیت فراوانی در سیستم‌های احتراقی مانند محفظه احتراق و همچنین تأثیر زیادی بر عملکرد اشتغال، محدوده و انتشار هیدروکربن‌های سوخته نشده و دود دارد. در محفظه احتراق توربین گاز، تأثیر زاویه پاشش بر عملکرد سامانه جرقه‌زنی اهمیت زیادی دارد.

۴-۵-۱- نحوه اندازه گیری زاویه وگرایی و انحراف پاشش

برای توصیف ساختار پاشش، دو زاویه پاشش متفاوت در این مطالعه تعریف شده‌اند که زاویه انحراف β و زاویه، واگرایی α هستند. زاویه انحراف پاشش (β)، زاویه بین محور در راستای جت آب و خط مرکزی پاشش ب صورتی که در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است، تعریف می‌شود. این زاویه در محور X-Z در نمای کناری تعیین می‌شود. زاویه واگرایی α پاشش که به عنوان زاویه پاشش در صفحه خط مرکزی زاویه انحراف Y محور (رو به پاشش) تعریف می‌شود، همان طور که در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است. این زاویه در محور Y-Z در نمای روبه رو تعیین می‌شود. ویدئوهایی که از ۴۰۰۰ فریم در دوربین پرسرعت ضبط شده بودند، به مجموعه‌ای از تصاویر تبدیل شدند. پردازش تصویر در دو مرحله، انجام می‌شود. در مرحله اول ابعاد فیزیکی یک پیکسل از هر تصویر باید مشخص شود. ما برای به دست آوردن اندازه زاویه پاشش با توجه به داشتن ابعاد قطر انژکتور تعداد پیکسل آن را مشخص نموده ایم. در مرحله دوم پردازش تصویر، عکس خام زاویه پاشش در حالت‌های مختلف دریافت می‌شود و در اولین مسیر، زاویه پایه پاشناسایی شده و مرز سایه‌های آن از تصاویر پس زمینه، جدا می‌شود. در آخر به کمک بعد فیزیکی به دست آمده در مرحله اول پردازش تصویر، تعداد پیکسل به دست آمده برای هر پارامتر به طول فیزیکی تبدیل می‌شود. در تعریف لبه‌ها، دو مقدار آستانه برای حذف نویز پیکسل‌های کوچک با این فرض که در لبه‌ها خطوط طولانی هستند، تنظیم شده‌اند. اندازه گیری زاویه پاشش با دو خط مستقیم کشیده شده روی لبه پاشش تعیین می‌شود که از نقطه برخورد دو جت تا نقطه‌ای که در آن صفحه آب به فروپاشی می‌رسد، همان طور که در شکل‌های ۴-۱۶ و ۴-۱۷ نشان داده شده است، تعریف می‌شود. بنابراین در مجموع ۲۰ تصویر برای هر اندازه گیری زاویه واگرایی و انحراف پاشش، پس پردازش شدند و میانگین‌ها برای هر شدت جریان آب و هوا در زوایای برخورد گزارش شدند.

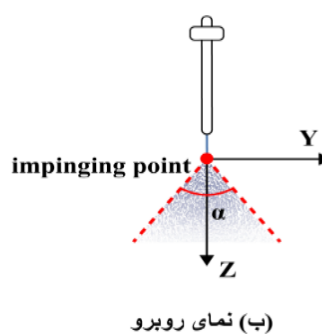
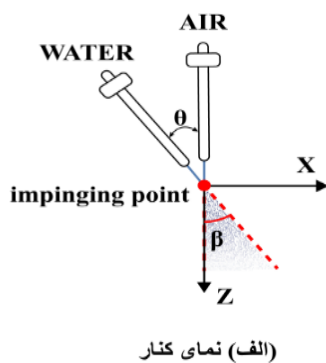


شکل ۴-۱۶- زاویه انحراف پاشش β



شکل ۴-۱۷- زاویه واگرایی پاشش α

متوسط زاویه واگرایی و زاویه انحراف پاشش واقع در فاصله ۱۰ میلی متر از خروجی دو انژکتور در نقطه برخورد محور X و Y به دست می آید. متوسط زوایای پاشش با استفاده از ۲۰ فریم متوالی با دامنه عمومی، برنامه پردازش تصویر مبتنی بر جاوا توسط برنامه دیجی مایزر اندازه گیری شدند. شماتیک زوایای پاشش در دو سطح صفحه $(X-Z)$ و $(Y-Z)$ در شکل ۴-۱۸ نمایش داده شده است.



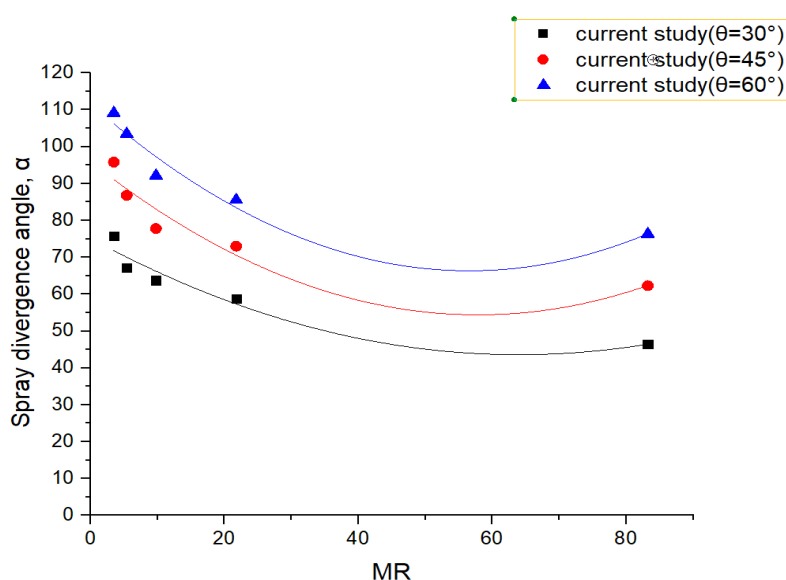
شکل ۴-۱۸- شماتیک زوایای پاشش در دو نمای کنار و روبه رو

چندین متغیر از جمله شدت جریان حجمی مایع، شدت جریان جرمی گاز، ویسکوزیته مایع، خواص فیزیکی مایع (کشش سطحی و چگالی)، هندسه و قطر روزنه خروجی انژکتور بر روی زاویه پاشش موثر هستند. کشش سطحی و چگالی برای مایعات تراکم پذیر و دارای سطح کشسان قوی مهم است و در عددهای رینولدز کم که سرعت مایع و گاز کم است، تأثیر زیادی دارد. به علت تأثیر زیاد شدت جریان جرمی هوا بر روی زاویه پاشش، نمودارهای زاویه واگرایی و انحراف پاشش بر حسب پارامترهای MR ، GLR و U_L رسم شدند.

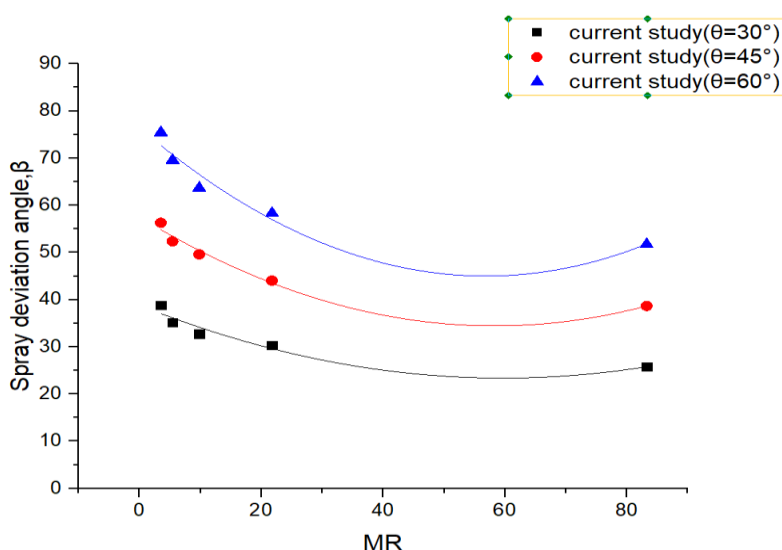
زوایای پاشش بر حسب MR (نسبت تکانه هوا به آب) که در معادله تعریف (۴-۴) شده است که در شکل‌های ۴-۱۹ و ۴-۲۰ ارائه شده‌اند. دو زاویه واگرایی و انحراف پاشش به سرعت با افزایش MR به سمت یک مقدار ثابت فراتر از $MR=10$ کاهش پیدا می‌یابد. نشان می‌دهد که هیچ دلیلی برای افزایش نرخ جریان هوا فراتر از یک مقدار خاص برای هر نرخ جریان آب وجود ندارد، زیرا زوایای پاشش تغییر نخواهد کرد. به طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد، برای زاویه واگرایی مقادیر ثابت برای زوایای برخورد ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب متوسط اعداد ۷۵، ۹۵ و ۱۰۹ درجه و برای زاویه انحراف مقادیر ثابت برای زوایای برخورد ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب متوسط اعداد ۳۲، ۴۸ و ۶۶ درجه است. نشان می‌دهد که زاویه پاشش واگرایی و انحراف با MR کاهش می‌یابد و به سمت مقدار ثابتی میل می‌کند به طوری که MR بیش از ۱۰ برای جریان هوا ۳۰ گرم بر دقیقه افزایش می‌یابد. هیچ مقیاس‌بندی آشکاری از زاویه پاشش با MR را نمی‌توان مشاهده کرد، اما زوایای برخورد بزرگ‌تر منجر به بزرگ‌تر شدن پاشش می‌شوند.

با افزایش قابل توجه مقدار MR ، ساختار پاشش به شدت تغییر می‌کند. جت هوا به صفحه آب نفوذ می‌کند و در هر مقدار MR پایین‌تر از این، صفحه آب در دوبخش مجزا جریان می‌یابد تا اینکه در نهایت یک ساختار مه مانند را فرض می‌کند. بحث بالا به وضوح اهمیت نسبت اندازه تکانه را نشان می‌دهد، MR به عنوان یک عامل مهم که ویژگی‌های پاشش را دیکته می‌کند، می‌باشد. هم‌چنین در بالا مشاهده شد که

زاویه برخورد نیز نقش مهمی در تعیین اندازه‌های زوایای α و β دارد که می‌توان متوجه شد زاویه با MR به آرامی و تقریباً به صورت نمایی برای جریان‌های هوا کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند که زاویه پاشش با MR با جریان جرمی هوا به عنوان یک پارامتر مقیاس گذاری می‌شود و به جت آب برخورد کننده با زاویه حساس نیست.



شکل ۴-۱۹- زوایای واگرایی پاشش بر حسب MR



شکل ۴-۲۰- زوایای انحراف پاشش بر حسب MR

شکل ۴-۲۱ نشان دهنده زاویه واگرایی پاشش از نمای روبه‌رو در مقابل جریان جت آب برای شدت جریان هوا و سه زاویه برخورد ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه می‌باشد. مقایسه زوایای برخورد و سرعت جت آب در در زوایای

برخورد مختلف نشان داده شده است. مشاهده می شود که زاویه واگرایی پاشش با نرخ شدت جریان جرمی جریان هوا افزایش می یابد و همچنین به صورت خطی با سرعت جریان آب افزایش می یابد. جریان شدت جریان جرمی هوای بالاتر، منجر به گسترش سریع جت هوا و در نتیجه، باعث زاویه واگرایی پاشش عریض تر می شود. زاویه برخورد یکی از عوامل تأثیر گذار زاویه پاشش جت ها می باشد، زیرا نرخ افزایش برای زاویه ۶۰ درجه بیش تر از زاویه ۳۰ و ۴۵ درجه است. برای یک زاویه برخورد ثابت، افزایش نرخ سرعت جریان آب، زاویه واگرایی پاشش را افزایش می دهد.

همان طور که سرعت آب افزایش می یابد، سرعت فروپاشی جت آب در سرعت بالا نسبت به سرعت های کمتر بسیار شدیدتر است، به طوری که پاشش در آن محدود می ماند. افزایش در زاویه برخورد در نرخ های جریان آب پایین بیش تر است. تفاوت در زاویه واگرایی پاشش بین صفحات در سرعت های جریان آب بالاتر بیش تر است. با توجه به تأثیر عدد در زاویه برخورد ۶۰ درجه، مقدار تغییرات زاویه واگرایی پاشش شدیدتر از زوایای دیگر می باشد. مشاهده می شود که زاویه پاشش در زاویه برخورد ۶۰ درجه و در زاویه برخورد ۳۰ درجه به ترتیب حداکثر و حداقل می باشد. حداکثر عدد زاویه واگرایی پاشش در سرعت ۶/۶۵ متر بر ثانیه و شدت جریان جرمی ۳۰ گرم بر دقیقه در زاویه برخورد ۶۰ درجه عدد ۱۰۹/۲ است. حداقل عدد زاویه واگرایی پاشش در سرعت ۱/۳۳ متر بر ثانیه و شدت جریان جرمی ۵ گرم بر دقیقه در زاویه برخورد ۶۰ درجه عدد ۳۴/۰۳ است. حداکثر عدد زاویه واگرایی پاشش در سرعت ۶/۶۵ متر بر ثانیه و شدت جریان جرمی ۳۰ گرم بر دقیقه در زاویه برخورد ۴۵ درجه عدد ۹۵/۷۷ است. حداقل عدد زاویه واگرایی پاشش در سرعت ۱/۳۳ متر بر ثانیه و شدت جریان جرمی ۵ گرم بر دقیقه در زاویه برخورد ۴۵ درجه عدد ۳۰/۱۹ است. حداکثر عدد زاویه واگرایی پاشش در سرعت ۶/۶۵ متر بر ثانیه و شدت جریان جرمی ۳۰ گرم بر دقیقه در زاویه برخورد ۳۰ درجه عدد ۷۵/۷۵ است. حداقل عدد زاویه واگرایی پاشش در سرعت ۱/۳۳ متر بر ثانیه و شدت جریان جرمی ۵ گرم بر دقیقه در زاویه برخورد ۳۰ درجه عدد ۲۴/۱۱ است.

عدم قطعیت در واحدهای اندازه گیری اصلی برای زاویه پاشش در حدود ۷/۷۸٪ می باشد. عدم قطعیت نسبی عدم قطعیت را به عنوان درصدی از مقدار اصلی می دهد.

جدول ۴-۳- حداکثر عدد زاویه واگرایی پاشش با شدت جریان ۳۰ گرم بر دقیقه و سرعت ۶/۶۵ متر بر ثانیه

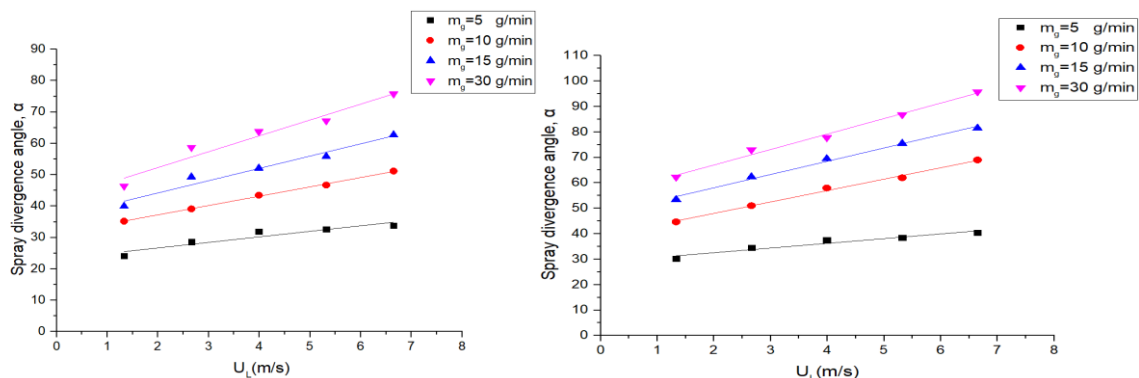
زاویه برخورد	حداکثر عدد زاویه واگرایی پاشش
۳۰	۷۵/۷۵
۴۵	۹۵/۷۷
۶۰	۱۰۹/۲

جدول ۴-۴- حداقل عدد زاویه واگرایی پاشش با شدت جریان ۵ گرم بر دقیقه و سرعت ۱/۳۳ متر بر ثانیه

زاویه برخورد	حداقل عدد زاویه واگرایی پاشش
۳۰	۲۴/۱۱
۴۵	۳۰/۱۹
۶۰	۳۴/۰۳

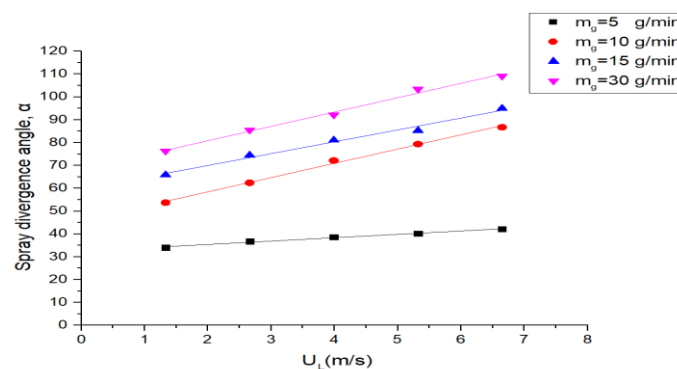
زوایای واگرایی پاشش و هم زوایای انحراف با نرخ جریان جرمی هوا در نرخ جریان آب ثابت افزایش می یابد؛ اما اثرات نرخ جریان آب در نرخ های جریان جرمی هوا بزرگ تر از ۵ گرم بر دقیقه، درخور توجه نیست. در هر پنج سرعت خروجی جت آب در هر سه زاویه برخورد مختلف به صورت خطی زاویه ها افزایش پیدا می کند. در هر سه زاویه برخورد کم ترین تغییرات برای شدت جرمی ۵ گرم بر ثانیه است. اندازه زاویه های به دست آمده برای زاویه برخورد ۶۰ درجه نسبت به دو زاویه دیگر بیش تر است. زاویه پاشش روند افزایشی را با افزایش سرعت خروج جت آب نشان می دهد، به دلیل این واقعیت که تکانه جت آب بالاتر منجر به نیروی ضربه بزرگ تری می شود که باعث می شود قطرات آب به سمت کناره های پاشش حرکت کنند. به طور کلی، به نظر می رسد که زاویه پاشش در یک زاویه برخورد بزرگ تر با همان سرعت جریان هوا

و آب بزرگتر باشد؛ زیرا در یک زاویه برخورد بالاتر، اندازه تکانه جت آب بزرگتر است که منجر به یک نیروی قویتری می‌شود. افزایش سرعت آب در نقطه برخورد بین دو جت باعث می‌شود که ضخامت صفحه جت آب بزرگتر شده، در نتیجه در هنگام فروپاشی شاهد زاویه محصور شده بیش‌تری بین دو جت هستیم.



الف) زاویه ۳۰ درجه

ب) زاویه ۴۵ درجه

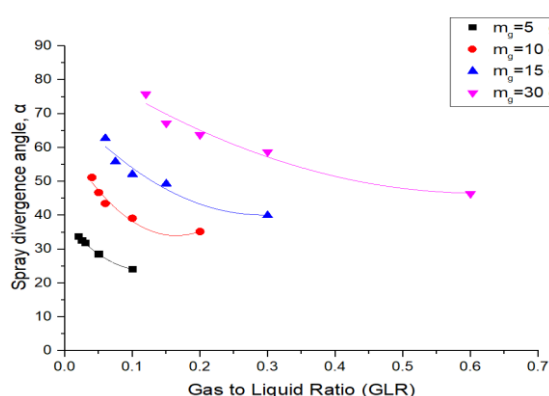


ج) زاویه ۶۰ درجه

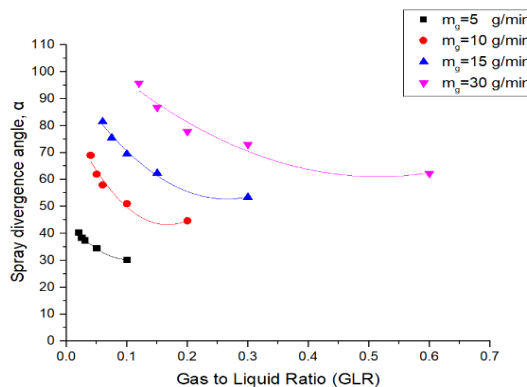
شکل ۴-۲۱- زاویای واگرایی پاشش بر حسب سرعت‌های آب در زوایای مختلف

به‌طور کلی می‌توان مشاهده کرد که افزایش نرخ جریان هوا نسبت به نرخ شدت جریان آب (یعنی افزایش GLR) باعث کاهش زاویه انحراف و واگرایی پاشش برای هر دو زاویه پاشش می‌شود؛ در نتیجه، هوای متمیزه کننده آب را در منطقه وسیع‌تری با یک زاویه پاشش بزرگ‌تر، متمیزاسیون می‌کند. تغییرات زاویه واگرایی پاشش با نرخ جریان هوای مختلف بر حسب پارامتر GLR در شکل ۴-۲۲ نشان داده شده است. افزایش شدت جریان جرمی هوا در یک شدت جریان حجمی ثابت آب، نشان‌دهنده افزایش در زاویه واگرایی پاشش برای همه شدت جریان‌های جریان هوا مورد مطالعه هست. افزایش مداوم در GLR، زاویه پاشش را به تدریج

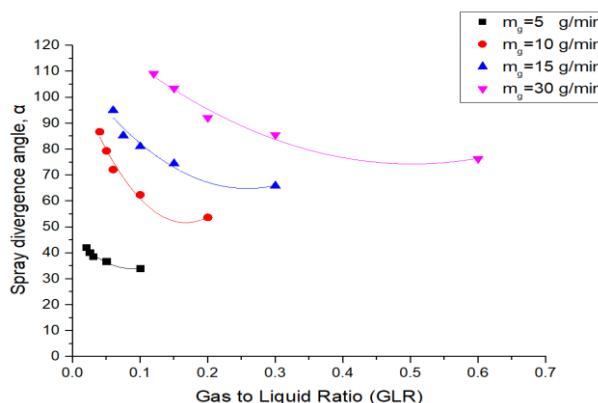
کاهش می‌دهد. از نظر GLR، افزایش GLR منجر به کاهش زاویه پاشش در تمامی شدت جریان های جریان هوا می‌شود. تغییر زاویه برخورد پاشش نسبت به GLR نشان می‌دهد که در یک GLR داده‌شده، افزایش نرخ جریان گاز، زاویه واگرایی پاشش را افزایش می‌دهد. اندازه‌گیری‌های تجربی نشان می‌دهند که در صفحه آب تولیدشده، افزایش سرعت جریان آب، زاویه واگرایی پاشش را افزایش می‌دهد. با این حال، زاویه واگرایی پاشش با شدت جریان جرمی هوا رابطه معنی‌داری ندارد. افزایش GLR کاهش زاویه را نشان می‌دهد. نتایج هم‌چنین نشان می‌دهند که برای یک GLR ثابت، افزایش نرخ شدت جریان جریان هوا، زاویه واگرایی پاشش را افزایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که زاویه واگرایی پاشش با نرخ شدت جریان هوا افزایش می‌یابد و هم‌چنین به‌صورت نمایی با نرخ جریان آب کاهش می‌یابد. کاهش زاویه پاشش با افزایش GLR، یکی از ویژگی‌های مهم انژکتور برای عمل احتراق است.



الف) زاویه ۳۰ درجه



ب) زاویه ۴۵ درجه



ج) زاویه ۶۰ درجه

شکل ۴-۲۲- اثر GLR بر زاویه واگرایی پاشش از نمای روبه‌رو

شکل ۴-۲۳ نشان دهنده زاویه انحراف پاشش از نمای روبه‌رو در مقابل جریان جت آب برای شدت جریان هوا و سه زاویه برخورد ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه است. مشاهده می‌شود که زاویه انحراف پاشش با نرخ شدت جریان جرمی جریان هوا افزایش می‌یابد و همچنین به صورت خطی با سرعت جریان آب افزایش می‌یابد. جریان شدت جریان جرمی هوای بالاتر، منجر به گسترش سریع جت هوا و در نتیجه، باعث می‌شود که زاویه واگرایی پاشش عریض‌تر می‌شود. زاویه برخورد یکی از عوامل تأثیرگذار زاویه پاشش جت‌ها می‌باشد؛ زیرا نرخ افزایش برای زاویه ۶۰ درجه بیش‌تر از زاویه ۳۰ و ۴۵ درجه است. برای یک زاویه برخورد ثابت، افزایش نرخ سرعت جریان آب، زاویه انحراف پاشش را افزایش می‌دهد. مقدار زاویه واگرایی پاشش با افزایش شدت جریان جرمی جریان هوا، افزایش می‌یابد. زیرا جریان هوا مقدار تکانه و انرژی لازم را برای فروپاشی جت آب در نقطه فراهم می‌کند. همان‌طور که سرعت آب افزایش می‌یابد، سرعت فروپاشی جت آب در سرعت بالا نسبت به سرعت‌های کمتر بسیار شدیدتر است، به‌طوری که پاشش در آن محدود می‌ماند. افزایش در زاویه، برخورد در نرخ‌های جریان آب پایین بیش‌تر است. تفاوت در زاویه انحراف پاشش بین صفحات در سرعت‌های جریان آب بالاتر بیش‌تر است. در زاویه برخورد ۶۰ درجه، مقدار تغییرات زاویه وگرایی پاشش شدیدتر از زوایای دیگر است. مشاهده می‌شود که زاویه انحراف پاشش در زاویه برخورد ۶۰ درجه و در زاویه برخورد ۳۰ درجه به ترتیب حداکثر و حداقل است. حداکثر عدد زاویه انحراف پاشش در سرعت ۶/۶۵ متر بر ثانیه و شدت جریان جرمی ۳۰ گرم بر دقیقه در زاویه برخورد ۶۰ درجه عدد ۷۵/۴۴ است. حداقل عدد زاویه انحراف پاشش در سرعت ۱/۳۳ متر بر ثانیه و شدت جریان جرمی ۵ گرم بر دقیقه در زاویه برخورد ۶۰ درجه عدد ۳۰/۲۷ است. حداکثر عدد زاویه انحراف پاشش در سرعت ۶/۶۵ متر بر ثانیه و شدت جریان جرمی ۳۰ گرم بر دقیقه در زاویه برخورد ۴۵ درجه عدد ۵۶/۳۲ است. حداقل عدد زاویه انحراف پاشش در سرعت ۱/۳۳ متر بر ثانیه و شدت جریان جرمی ۵ گرم بر دقیقه در زاویه برخورد ۴۵ درجه عدد ۲۳/۱۴ است. حداکثر عدد زاویه انحراف پاشش در سرعت ۶/۶۵ متر بر ثانیه و شدت جریان جرمی ۳۰ گرم بر دقیقه

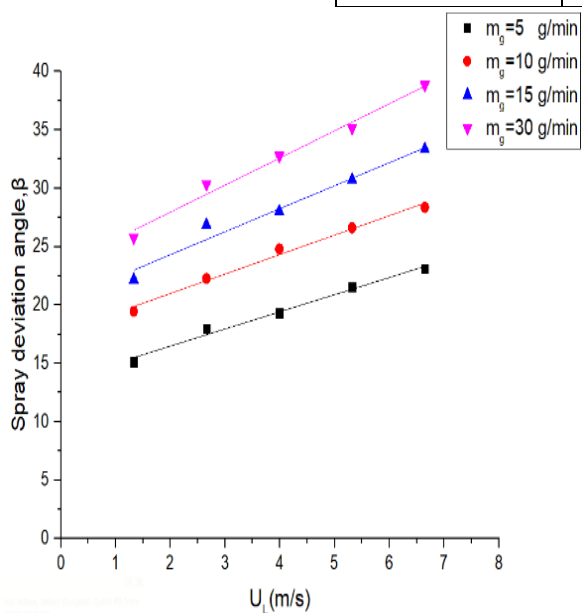
در زاویه برخورد ۳۰ درجه عدد ۳۸/۸۱ است. حداقل عدد زاویه انحراف پاشش در سرعت ۱/۳۳ متر بر ثانیه و شدت جریان جرمی ۵ گرم بر دقیقه در زاویه برخورد ۳۰ درجه عدد ۱۶/۱۳ است.

جدول ۴-۵- حداکثر عدد زاویه انحراف پاشش با شدت جریان ۳۰ گرم بر دقیقه و سرعت ۶/۶۵ متر بر ثانیه

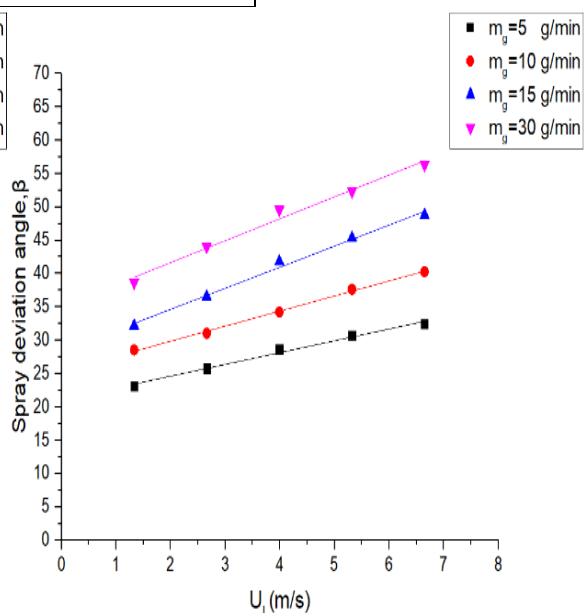
زاویه برخورد	حداکثر عدد زاویه انحراف
۳۰	۳۸/۸۱
۴۵	۵۶/۳۲
۶۰	۷۵/۴۴

جدول ۴-۶- حداقل عدد زاویه انحراف پاشش با شدت جریان ۵ گرم بر دقیقه و سرعت ۱/۳۳ متر بر ثانیه

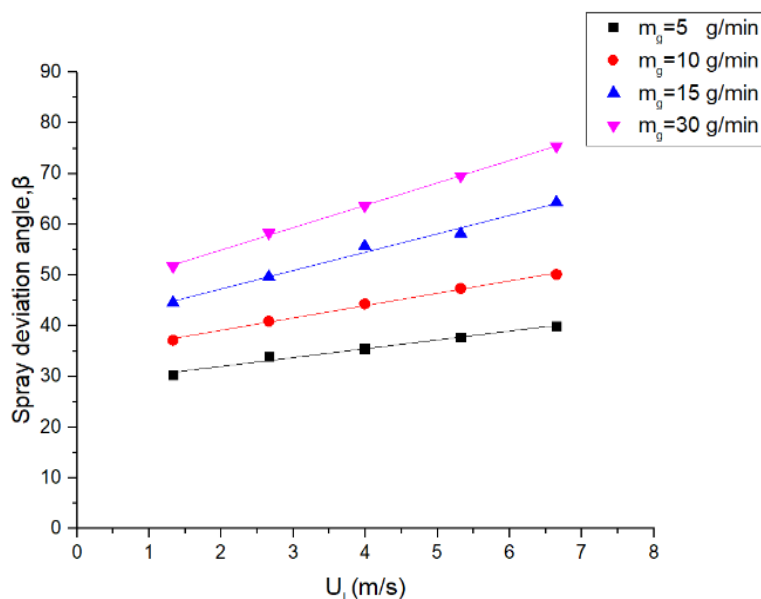
زاویه برخورد	حداقل عدد زاویه انحراف
۳۰	۱۶/۱۳
۴۵	۲۳/۱۴
۶۰	۳۰/۲۷



الف) زاویه ۳۰ درجه



ب) زاویه ۴۵ درجه



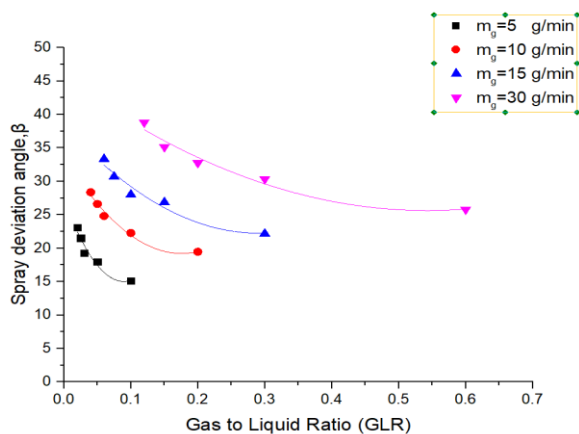
ج) زاویه ۶۰ درجه

شکل ۴-۲۳- زوایای انحراف پاشش بر حسب سرعت‌های آب در زوایای مختلف

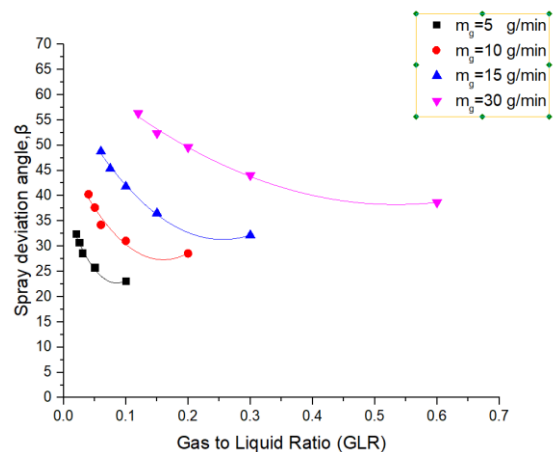
تغییرات زاویه انحراف پاشش با نرخ جریان هوای مختلف برحسب پارامتر GLR در شکل ۴-۲۴ نشان داده شده است. افزایش شدت جریان جرمی هوا در یک شدت جریان حجمی ثابت آب، نشان‌دهنده افزایش در زاویه انحراف پاشش برای همه شدت جریان های جریان هوا مورد مطالعه هست. از نظر GLR، افزایش GLR منجر به کاهش زاویه انحراف پاشش در تمامی شدت جریان های جریان هوا می‌شود. تغییر زاویه برخورد پاشش نسبت به GLR نشان می‌دهد که در یک GLR داده شده، افزایش نرخ جریان هوا، زاویه انحراف پاشش را افزایش می‌دهد. اندازه‌گیری‌های تجربی نشان می‌دهند که در صفحه آب تولید شده، افزایش سرعت جریان آب، زاویه انحراف پاشش را افزایش می‌دهد. با این حال، زاویه انحراف پاشش با شدت جریان جرمی هوا رابطه معنی داری ندارد. افزایش GLR کاهش زاویه انحراف را نشان می‌دهد. نتایج همچنین نشان می‌دهند که برای یک GLR ثابت، افزایش نرخ شدت جریان جریان هوا، زاویه انحراف پاشش را افزایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که زاویه انحراف پاشش با نرخ شدت جریان جریان هوا افزایش می‌یابد و همچنین به صورت نمایی با نرخ جریان آب کاهش می‌یابد. شدت جریان جرمی هوا، باعث افزایش پارامتر

GLR شده و شدت جریان حجمی آب، اثر کاهشی روی این پارامتر دارد؛ چون زاویه واگرایی پاشش تحت

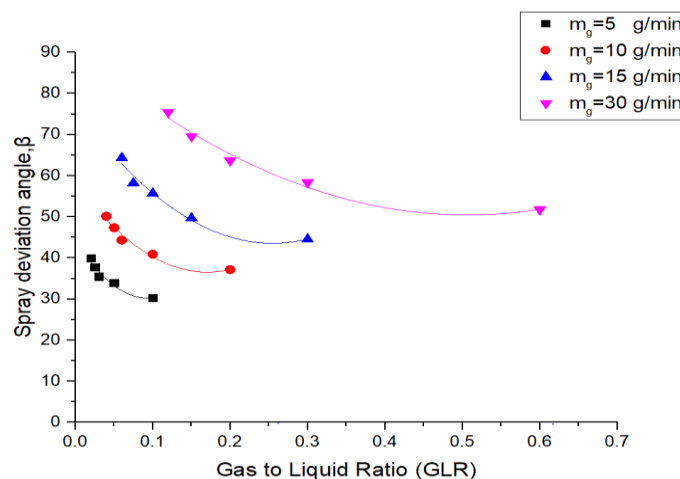
تأثیر شدت جریان جرمی هوا قرار می‌گیرد.



الف) زاویه ۳۰ درجه



ب) زاویه ۴۵ درجه



ج) زاویه ۶۰ درجه

شکل ۴-۲۴- اثر GLR بر زاویه واگرایی پاشش از نمای کناری

۴-۶- اندازه قطر و توزیع قطرات

۴-۶-۱- نحوه ثبت تصاویر قطرات ریز

برای چیدمان تصویربرداری از پدیده تشکیل قطرات ریز از امکانات ریز استفاده شده است:

۱) دوربین عکسبرداری پر سرعت: دوربین مورد استفاده در این مطالعه، دوربین مدل Dimax S1

ساخت شرکت PCO اجزا می‌باشد. این دوربین دارای حداکثر رزولوشن ۱۰۰۸ در ۱۰۰۸ پیکسل بوده که قابلیت تغییر به مقدارهای دیگر در نرم افزار Camware V- 3.13 دارد. این دوربین می‌تواند با سرعت ۴۵۰۰ فریم بر ثانیه با رزولوشن کامل خود تصویربرداری کند. کم‌ترین زمان نورگیری این دوربین ۴ میکروثانیه می‌باشد.

(۲) لنز دوربین: برای ثبت تصاویر بهتر و تنظیم میزان زوم و فوکوس با کیفیت‌تر یک لنز دوربین ساخت شرکت نیکون با فاصله کانونی ۷۵-۱۲/۵ و با قابلیت تنظیم دیافراگم بر روی $f: 1/4$ استفاده شده است.

(۳) منبع نور: از دو عدد پروژکتور نور ۲۰۰۰ وات برای تأمین نور لازم استفاده شده است. همچنین برای یکنواختی نور پروژکتور از یک دریچه مخصوص در اطراف پروژکتور استفاده شده است.

۴-۶-۲- نحوه پردازش تصویر قطرات ریز

دوربین پرسرعت مورد استفاده، در هر ثانیه ۴۰۰۰ عکس از قطرات ریز ایجاد شده از پاشش می‌گیرد. قبل از عکس‌برداری برای بهتر شدن روشنایی از یک مقوای سیاه به عنوان پس‌زمینه، پشت انژکتور و دو عدد پروژکتور جلوی آن استفاده شد. برای محاسبه اندازه قطرات، در ابتدا باید تصاویر گرفته شده در نرم‌افزار لب ویو^۱ مورد پردازش قرار گرفته و پس از انتخاب قطرات مناسب و حذف قطراتی که در تصویر از کیفیت غیرمطلوبی برخوردار هستند، به محاسبه قطر قطرات پرداخته می‌شود. با توجه مطالب گفته شده، مراحل زیر برای رسیدن به هدف مذکور انجام انجام گردیده است:

(۱) تفاضل تصویر: در مرحله، نخست باید تصویر اصلی موجود در شکل ۴-۲۵ از تصویر زمینه بدون پاشش کم شود. با انجام این عمل پیکسل‌های نامناسب با قطرات حذف شده و در تصویری که حاصل می‌شود که قطرات به‌طور کامل از پس‌زمینه، تفکیک هستند.

^۱LabView software v. 2018

۲) حذف قطرات فوکوس نشده و بی کیفیت: مهم ترین مرحله پردازش، حذف کردن قطراتی هست که تصویر آن ها تار و بی کیفیت بوده و به علت عدم کیفیت مناسب نمی توان از آن ها برای محاسبه اندازه قطرات استفاده کرد. برای این عمل نیاز است تا با تهیه بلوک دیاگرام مخصوص حذف قطرات بی کیفیت در نرم افزار لب و یو انجام شود؛ از آنجا که تنظیمات عکس برداری شامل تعداد فریم، میزان فوکوس و لنز مشترک استفاده شده ثابت بوده و هیچ تغییری در پارامترهای عکس صورت نگرفته با انجام فیلتراسیون های مختلف در حذف قطرات بی کیفیت برای کلیه تصاویر، نتیجه به دست آمده می تواند قابل اتکا باشد؛ برای مثال قطرات بی کیفیت مشخص در شکل ۴-۲۶ قطراتی هستند که به علت عدم نوردهی کافی یا عدم فوکوس کافی نمی توان برای محاسبه اندازه قطرات از آن ها استفاده کرد.

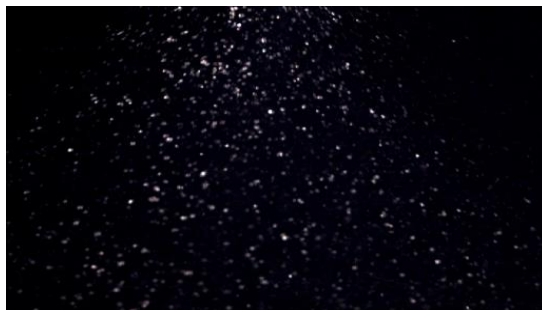
۳) ایجاد تصویر باینری: در این مرحله از پردازش تصویر باید تصاویر انتخاب شده در مرحله قبلی به تصاویر باینری تبدیل شوند. زمانی که تصاویر را آنالیز می کنیم یک سری اعداد ۰ و ۱ به دست می آید. یک تصویر باینری فقط شامل مقادیر ۰ و ۱ می باشد؛ یعنی برای مثال قطرات به رنگ سفید با مقدار یک و پس زمینه پاشش به رنگ سیاه با مقدار ۰ ارزیابی می شود. این عمل با بلوک دیاگرام پردازش تصویر در نرم افزار لب و یو انجام شده است. شکل ۴-۲۷ تصاویر پردازش شده، نمایش می دهد.

۴) تشخیص تعداد قطرات و تعداد پیکسل های آن: در این مرحله به کمک بلوک دیاگرام مخصوص تشخیص اشیاء در نرم افزار لب و یو، تعداد قطرات موجود در هر تصویر و تعداد پیکسل های هر قطره محاسبه می شود. در پایان پردازش هر تصویر در این مرحله، تعداد قطرات موجود و تعداد پیکسل های در برگرفته ی آن محاسبه می شود.

۵) نحوه محاسبه طول واقعی هر پیکسل: برای محاسبه ی طول واقعی هر پیکسل، باید از یک شیء با طول مشخص و با دقت بالا که اندازه ی واقعی آن معلوم است، استفاده کرده و سپس با تقسیم طول واقعی شیء تعداد پیکسل دربر گرفته آن، به مقدار واقعی هر پیکسل دست یافت. برای این کار از قطر انژکتور استفاده شده

که ساخت آن با دقت بالایی صورت گرفته و مقدار قطر آن مشخص است، استفاده شده است. با انجام این کار طول هر پیکسل برابر $83/33$ میکرون محاسبه گردیده است.

(۶) محاسبه قطر قطرات: نحوه محاسبه قطر معادل بدین صورت است که تعداد پیکسل هر قطره به نوعی مشخص کننده مساحت هر قطره است. حال چنانچه قطره، در دید دو بعدی به صورت یک دایره فرض شود با توجه به در اختیار داشتن مقدار مساحت دایره، می توان قطر معادل آن را حساب کرد. به این منظور لازم است طول واقعی هر پیکسل برای محاسبه مقدار قطر هر قطره مشخص باشد.



شکل ۴-۲۵- نمونه ای از تصاویر از قطرات پاشش در شدت جریان 200 میلی لیتر بر دقیقه و 15 گرم بر دقیقه در عکس برداری 4000 فریم بر ثانیه



شکل ۴-۲۶- قطرات بی کیفیت و فوکوس نشده



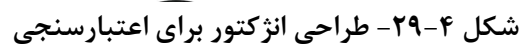
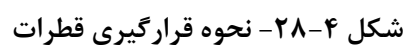
شکل ۴-۲۷- تصویر پردازش شده قطرات

قطر متوسط ساوتر (SMD) یا نسبت حجم متوسط به سطح متوسط قطرات مورد پاشش بوده و در سیستم‌های احتراقی به منظور ارزیابی کیفیت اتمیزاسیون به کار می‌رود. این پارامتر به نوعی نشان‌دهنده میزان ریزی قطرات حاصل از پاشش بر مبنای سطح تولیدشده توسط پاشش است. با توجه به استفاده فراوان این پارامتر در محفظه احتراق، از این نوع متوسط برای تعیین کیفیت پاشش در این پژوهش استفاده می‌گردد. سپس اندازه قطر متوسط ساوتر (SMD) در پاشش که با انژکتور تولیدشده است که به طور تجربی اندازه‌گیری شد. SMD به عنوان قطر کره‌ای تعریف می‌شود که دارای سطح حجمی یکسانی است و نسبت آن به عنوان ذره مورد نظر است. مقدار پارامتر $SMD = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot D_i^3}{\sum_{i=1}^n N_i \cdot D_i^2}$ ، در آن N_i تعداد قطرات و D_i قطر میانه دامنه اندازه i است. این نماد، توزیع پروفایل‌های SMD قطرات در یک خط مرکزی در راستای محور Z در مکان‌های پایین دست نقطه برخورد دو جت شکل می‌گیرد. تصاویر گرفته به رایانه، منتقل شدند و SMD محاسبه شده با استفاده از کد برنامه پردازش تصویر لب ویو (Lab View 2018) به دست آمدند. نرم افزار لب ویو برای تعدادی از تکنیک‌های پردازش تصویر برای شناسایی و برای بهبود تشخیص قطرات کوچک مورد، استفاده قرار گرفته است. در بخش زیر، برای نتایج اندازه‌گیری اندازه قطرات در مکان‌های مختلف پایین دست منطقه فروپاشی اولیه با تمرکز خاص بر منطقه، درست پایین دست منطقه فروپاشی اولیه ارائه شده است. با تغییر شرایط جریان و خواص سیال، تلاش شد تا وابستگی قطر متوسط قطرات (SMD) به مقادیر مختلف تعیین شود.

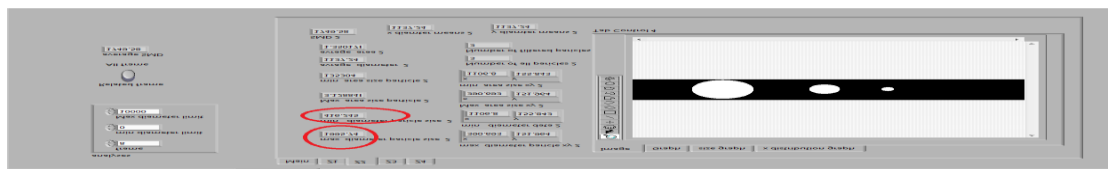
۳-۶-۳- بررسی میزان صحت سنجی اندازه گیری سائز قطرات توسط نرم افزار

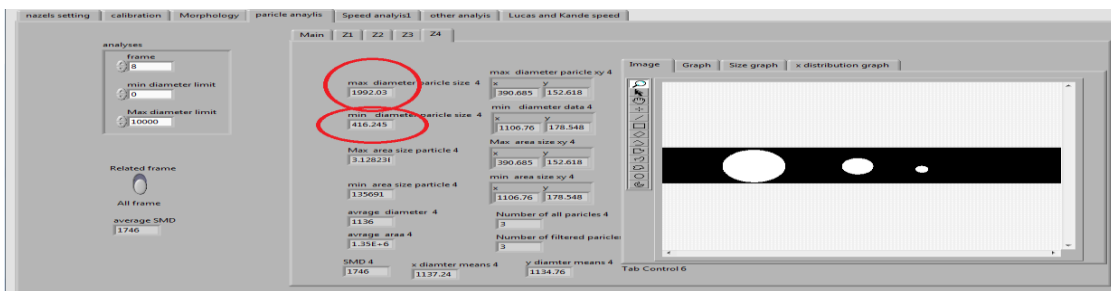
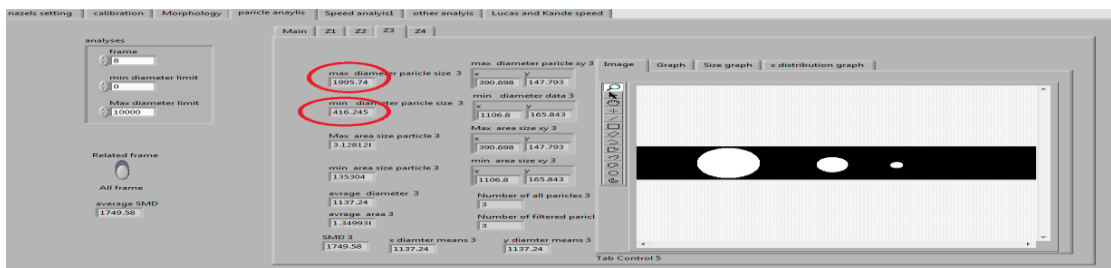
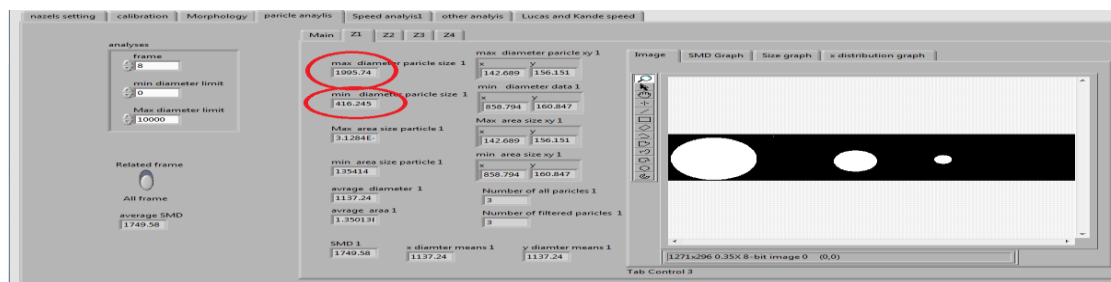
نرم افزار در دو قسمت کالیبره بودن و میزان صحت سنجی اطلاعات اندازه گیری مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا برای این منظور یک تصویر نمونه با استفاده از نرم افزار کورل طراحی شد. این تصویر شامل

در نظر گرفته شد.



می‌باشد. نتایج به‌دست آمده برای این ذرات توسط نرم افزار به‌صورت زیر است.





شکل ۴-۳۰- اجرای نرم افزار و به دست آوردن نتایج برای اعتبارسنجی نتایج

با توجه به تصاویر تعداد ذرات کاملاً به صورت صحیح و بدون خطا تشخیص داده شده، جدول ۴-۷- نتایج به دست آمده از اندازه گیری کوچک ترین و بزرگ ترین ذره برای چهار بازه انتخاب شده است.

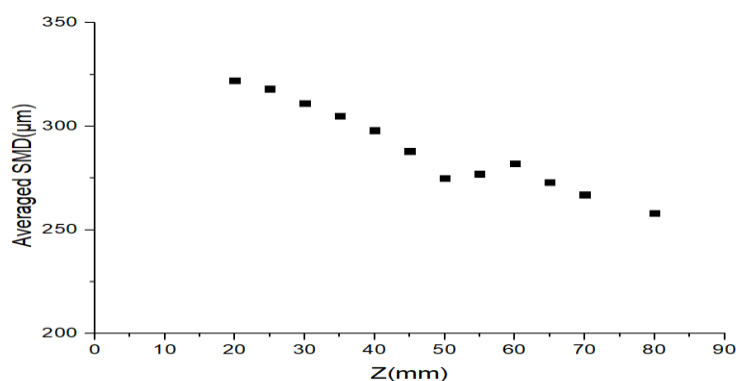
جدول ۴-۷- به دست آوردن خطای اندازه گیری نتایج

ناحیه	حداقل ۴۱۰ میکرون	حداکثر ۲۰۰۰ میکرون	متوسط خطای اندازه گیری
ناحیه اول	۴۱۶/۲۵ میکرون	۱۹۹۶/۷۴ میکرون	۵/۶ میکرون
ناحیه دوم	۴۱۶/۲۵ میکرون	۱۹۹۶/۷۴ میکرون	۶/۵ میکرون
ناحیه سوم	۴۱۶/۲۵ میکرون	۱۹۹۶/۷۴ میکرون	۶/۵ میکرون
ناحیه چهارم	۴۱۶/۲۵ میکرون	۱۹۹۶/۷۴ میکرون	۶/۶۱ میکرون

خطای به دست آمده چون در بازه زیر میزان دقت پیکسلی ۷/۴ میکرون هست کاملاً قابل قبول است و

لذا صحت داده های به دست آمده برای اندازه گیری اندازه، ذرات قابل قبول می باشد.

مقادیر SMD اندازه‌گیری شده در امتداد محورهای Z مختلف در پاشش تحت شرایط در شدت جریان حجمی آب ۲۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه و ۱۵ گرم بر دقیقه در شکل ۴-۳۱ نشان داده شده است. آزمایش‌ها با آب انجام شده و تبخیر قطرات در شرایط اتمسفر ناچیز است؛ بنابراین، اگرچه اندازه‌های مختلف قطرات ممکن است به‌طور متفاوت در پاشش پراکنده شوند؛ در نتیجه SMD متوسط باید تغییر کند. در فاصله ۲۰ میلی‌متری از نقطه برخورد، در حالت اتمیزاسیون اولیه، بعد از فروپاشی جت آب قطرات تشکیل بعد از فروپاشی جت در حدود ۳۲۲ میکرون است. هرچه به سمت پایین دست جریان از نقطه برخورد در راستای محور Z حرکت می‌کنیم به احتمال به دلیل وقوع اتمیزاسیون ثانویه اندازه قطرات کاهش پیدا می‌کند. ابتدا به حدود ۲۷۵ میکرون در $Z=75$ میلی‌متر می‌باید، احتمالاً به به دلیل فروپاشی ثانویه و سپس فراتر از آن به عدد ۲۹۰ میکرون در $Z=65$ میلی‌متر افزایش می‌یابد. سپس دوباره از $Z=65$ تا $Z=80$ دوباره، مقدار SMD کاهش پیدا می‌کند. عامل تغییر کوچک‌تر شدن اندازه قطرات در راستای محور Z در پایین دست نقطه برخورد می‌توان به افزایش مقاومت هوا اشاره کرد.

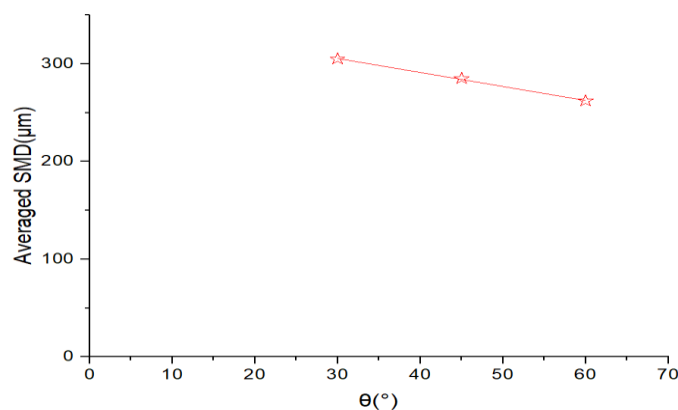


شکل ۴-۳۱- شدت جریان حجمی ۲۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه و زاویه ۴۵ درجه

اندازه‌گیری‌ها در موقعیت محوری $Z=50$ میلی‌متر برای شرایط عملیاتی یکسان شدت جریان جرمی ۲۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه و زاویه برخورد ۴۵ درجه در شکل ۴-۳۲ به دست آمدند. این یک یافته مهم است که نشان می‌دهد کیفیت اتمیزاسیون، در نتیجه با زاویه برخورد جت

تغییر می‌کند که مقادیر SMD کوچک‌تر حاصل می‌شود؛ از آنجا که ورودی انرژی در این حالت ثابت نگه‌داشته می‌شود و SMD متوسط با تغییر زاویه برخورد تغییر می‌کند، بازده اتمیزاسیون تحت تأثیر زاویه برخورد قرار می‌گیرد. این نتیجه، نشان می‌دهد که اهمیت زاویه برخورد بین جریان‌های هوا و آب تأثیر نسبتاً زیادی برای انژکتورهای مورد استفاده فعلی دارد. زاویه برخورد ۳۰ درجه دارای بزرگ‌ترین اندازه قطرات می‌باشد. افزایش زاویه برخورد ۳۰ درجه تا ۶۰ درجه در فاصله محوری ۵۰ میلی‌متر اندازه قطرات حدود ۲۳٪ کاهش پیدا می‌کند.

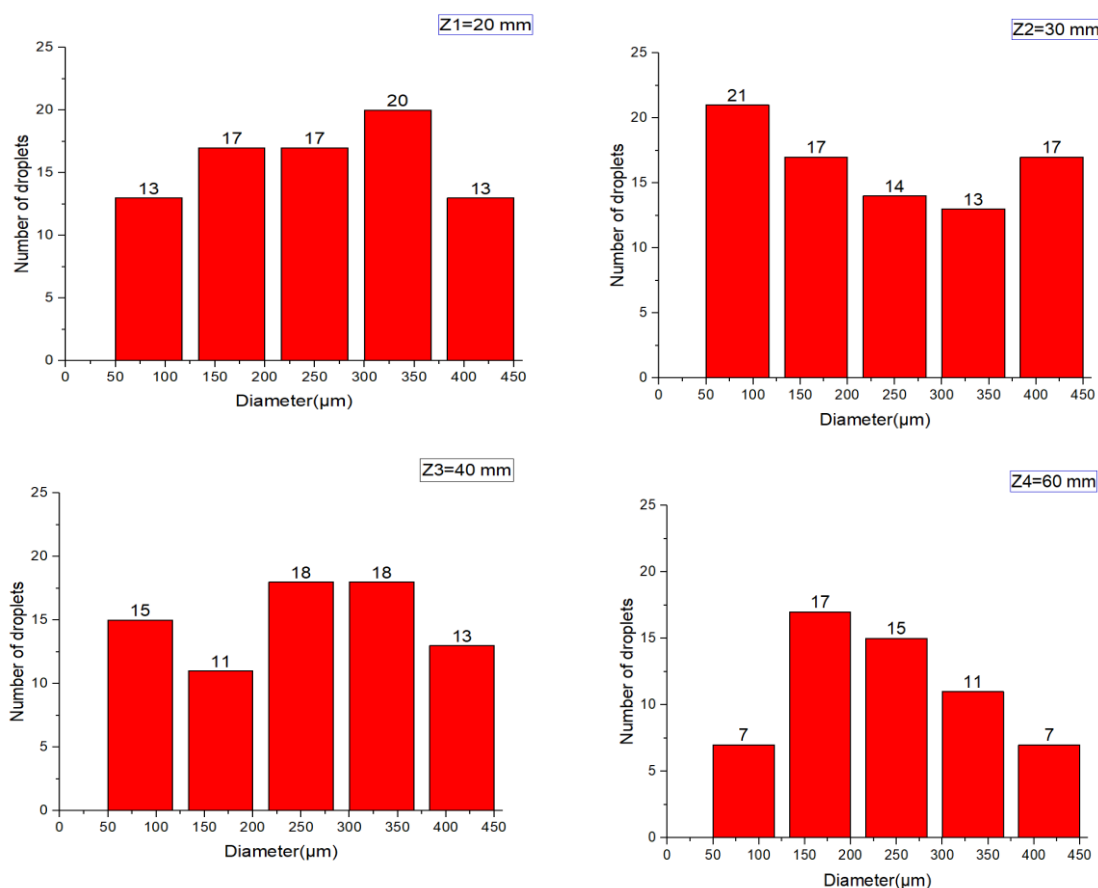
عدم قطعیت در واحدهای اندازه‌گیری اصلی برای اندازه قطر قطره در حدود ۹/۴۲٪ می‌باشد. عدم قطعیت نسبی عدم قطعیت را به عنوان درصدی از مقدار اصلی می‌دهد.



شکل ۴-۳۲- تأثیر زاویه برخورد بر SMD متوسط در صفحه با $Z=50$ میلی‌متر در شدت جریان ۲۰۰ میلی‌لیتر و شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه

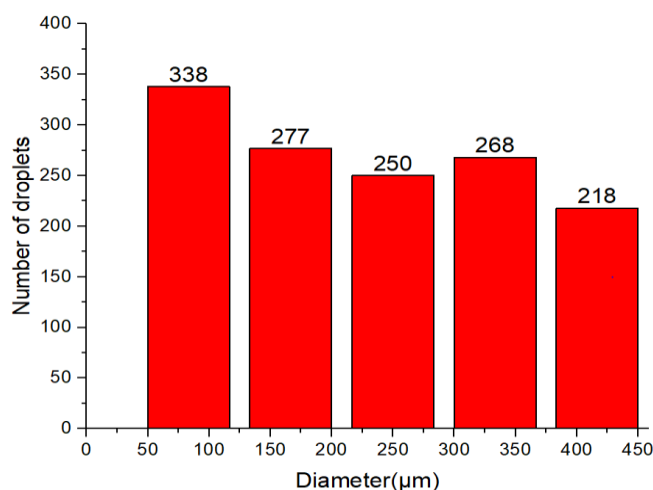
اندازه توزیع تعداد قطرات برحسب اندازه در حالت شدت جریان حجمی ۲۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه و زاویه ۴۵ درجه در شکل ۴-۳۳ نشان داده شده است. اندازه قطر قطرات در امتداد محور X در موقعیت‌های محوری مختلف از $Z=20$ میلی‌متر پایین دست نقطه برخورد تا $Z=60$ میلی‌متر انجام شد. ابتدا توزیع اندازه و تعداد قطرات در فواصل کم از نقطه برخورد پاشش بزرگ‌تر از نواحی دورتر از نقطه برخورد در راستای محور Z است، همان‌طور که هیستوگرام‌های اندازه قطرات در شکل ۴-۳۳ نشان می‌دهند. به دلیل وقوع اتمیزاسیون اولیه در نقطه برخورد دو جت، پس از فروپاشی جت

آب، لیگامنت‌ها به‌طور کامل به فروپاشی نرسیده‌اند؛ پس همین علت فراوانی و اندازه قطرات در نزدیکی نقطه برخورد دوجت بیش‌تر است؛ پس اگر در امتداد محور Z حرکت کنیم و هرچه از نقطه برخورد دور شویم، اندازه قطرات با وقوع اتمیزاسون ثانویه، کاهش می‌یابد. هم‌چنین دوباره به‌دلیل پراکندگی ترجیحی اندازه‌های مختلف قطرات بعد از فروپاشی کامل اندازه، قطرات در ناحیه ۴۰ میلی‌متر پایین‌دست نقطه برخورد افزایش می‌یابد. شکل ۴-۳۳ به‌طور واضح‌تر نشان می‌دهد که کوچک‌ترین قطرات در ناحیه پاششی مرکزی حدود ۶۰ میلی‌متر در پایین‌دست نقطه برخورد وجود دارد.



شکل ۴-۳۳- توزیع قطرات شدت جریان حجمی ۲۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه تعداد کل قطرات در ناحیه پاشش شدت جریان حجمی ۲۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه و زاویه ۴۵ درجه در شکل ۴-۳۴ مشاهده می‌شود. فراوانی اندازه قطرات در کل ناحیه پاشش

قابل مشاهده است. همان طور که مشاهده می شود، اندازه قطر قطرات در بازه بین ۵۰ تا ۱۰۰ میکرون بیش تر از بازه های دیگر اندازه قطر است. بیش ترین قطرات ریز در ناحیه مرکزی پاشش هستند که به دلیل تأثیر زیاد نیروی جت هوا است. قویترین تغییر انرژی بین دو جت در ناحیه مرکزی پاشش است. در نواحی مختلف پاشش، قطر با قطرهای مختلف وجود دارد که برای به دست آوردن قطر متوسط ساوتر می توان از آن ها استفاده کرد. مقدار قطر متوسط ساوتر کل در کل نواحی پاشش حدود ۲۷۵ میکرون است. فراوانی موجود در ناحیه ۹۰ میلی متر نقطه برخورد به دست آورده شده است.

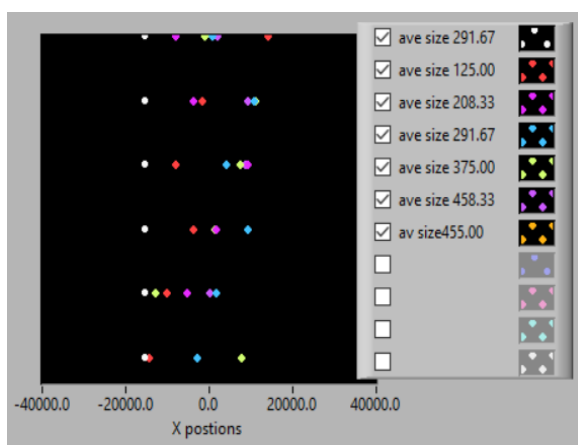


شکل ۴-۳۴- تعداد کل قطرات در ناحیه پاشش شدت جریان حجمی ۲۰۰ میلی لیتر بر دقیقه، شدت جریان

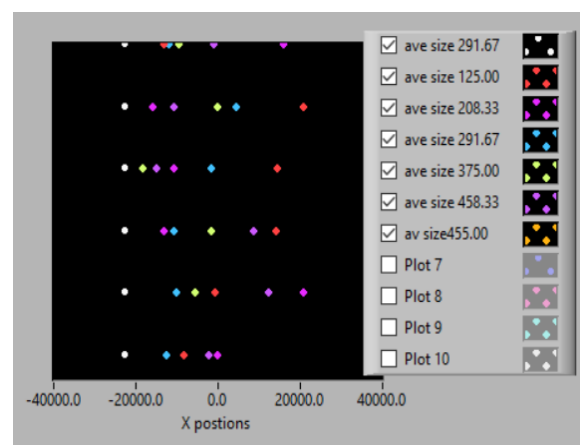
جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه و زاویه ۴۵ درجه

توزیع فضایی اندازه قطر در صفحه $X=0$ میلی متر فرض شد. همان طور که در شکل ۴-۳۵ مشاهده می شود که اندازه قطر در مرکز پاشش کوچک تر از لبه های پاشش است. اندازه گیری ها در امتداد محور X در موقعیت های محوری مختلف از $Z=20$ میلی متر پایین نقطه برخورد تا $Z=60$ میلی متر انجام شد. در هر چهار ناحیه، تغییرات اندازه قطر قطره در راستای محور X نشان داده شده است. فاصله تغییرات در محور X از $X=-40$ تا $X=+40$ میلی متر نشان داده شده است. نحوه جای گیری اندازه قطر در موقعیت مکانی ذکر شده در شکل ۴-۳۵ نشان داده شده است. مقادیر $X=+40$ و $X=-40$ میلی متر جز کناره های پاشش حساب می شوند. در مکان $X=0$ میلی متر ناحیه مرکزی پاشش حساب می آید.

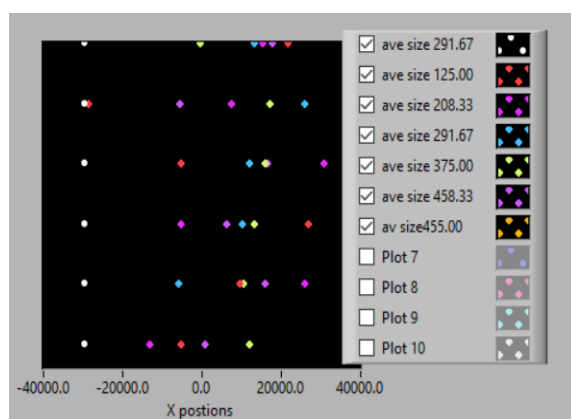
در نواحی مرکزی پاشش یا نزدیک به $X=0$ میلی‌متر، اندازه قطرات کمتر از سایر مکان‌های محوری است؛ با توجه به مشخص بودن تعداد و همچنین با داشتن اندازه قطرات می‌توان قطر متوسط ساوتر را حساب کرد. قطرات بزرگ‌تر به طرف کناره‌های پاشش متمایل هستند. برای هر ناحیه در راستای محور X ، قطر قطرات با حرکت به کناره‌های پاشش حداکثر ۴۵۸ میکرون افزایش می‌یابد. یکی از دلایل کوچک‌تر بودن قطر قطرات در مرکز پاشش به دلیل تأثیر زیاد جت هوا در پایین دست نقطه برخورد است. قوی‌ترین برهم‌کنش بین دو جت در ناحیه مرکزی پاشش است. اطراف پاشش تأثیر گذاری هوا روی میدان پاشش کم می‌شود؛ پس شاهد حضور قطر قطرات بزرگ‌تر هستیم. در ناحیه مرکزی پاشش به دلیل تأثیر زیاد هوا، لیگامنت‌های شکل گرفته زودتر به قطرات ریز تبدیل می‌شوند.



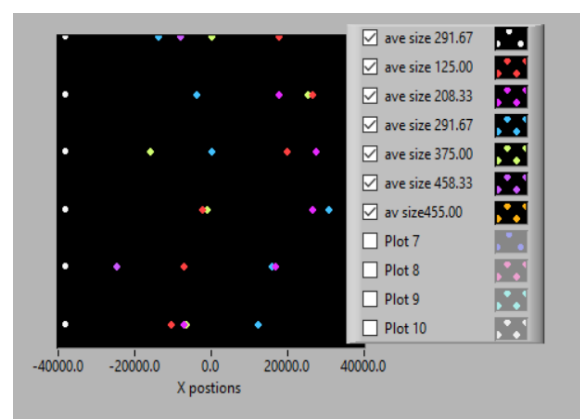
Z=20mm



Z=30 mm



Z=40 mm

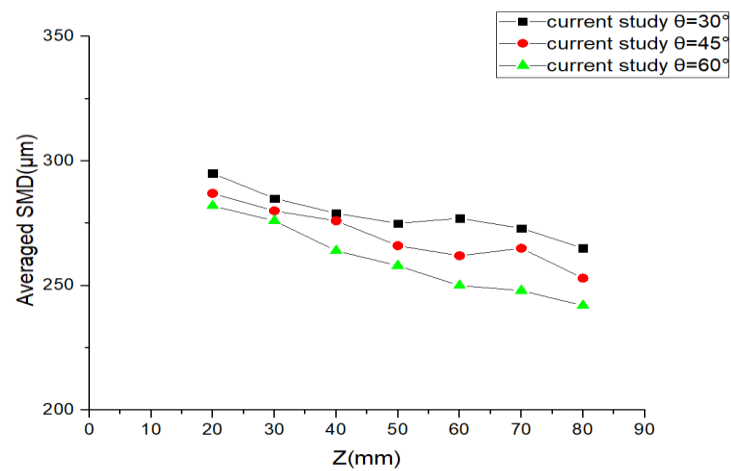


Z=60 mm

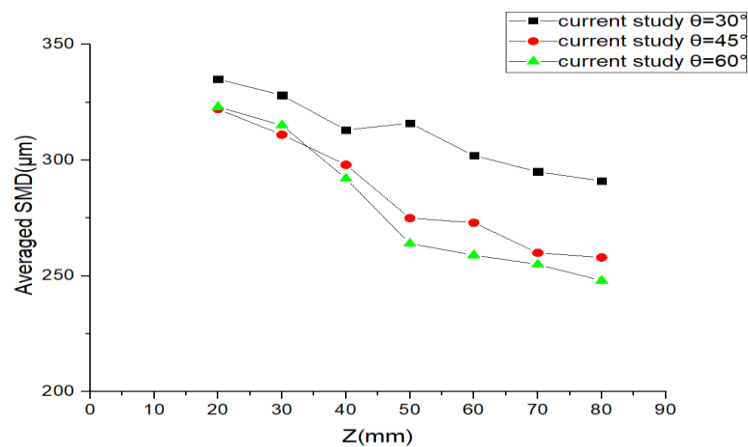
شکل ۴-۳۵- تغییرات اندازه قطرات در راستای شعاعی محور X

اثر زاویه برخورد جت آب بر توزیع اندازه قطرات با مقایسه، توزیع SMD در امتداد محور پاشش در زوایای برخورد ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه در شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه و شدت جریان حجمی ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، بررسی شد. در تمامی حالات زاویه برخورد، زاویه ۳۰ درجه نسبتاً دارای اندازه بزرگ‌تری از قطر متوسط ساوتر می باشد. هرچه زاویه برخورد بین دو جت بیش‌تر می شود، شاهد اندازه کوچک‌تری از اندازه قطر متوسط ساوتر هستیم. به‌طور کلی SMD در یک زاویه برخورد بزرگ‌تر به‌دلیل فشار برخورد بالاتر کوچک‌تر است که حجم آب بیش‌تری را از نقطه برخورد دور می‌کند و آب کم‌تری را در ناحیه مرکزی پاشش باقی می‌گذارد یعنی در زاویه برخورد بزرگ‌تر صفحه جت آب زودتر به فروپاشی می‌رسد.

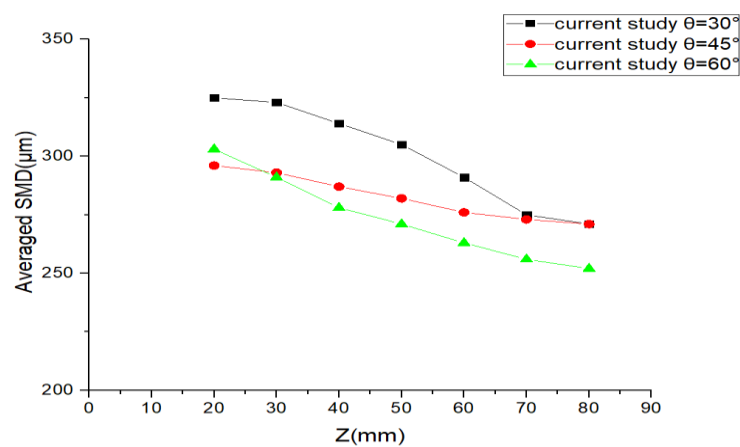
با این حال، هیچ تفاوت آشکاری بین حالت‌های ۴۵ و ۶۰ درجه در شدت حجمی ۲۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه در حدود ۷۰ میلی‌متر پایین‌دست نقطه برخورد و حالت‌های ۳۰ و ۴۵ درجه در شدت حجمی ۱۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه وجود ندارد که به این واقعیت نسبت داده می‌شود که در حدود $Z=75$ میلی‌متر، قطرات در هر حالت اندازه مشابهی دارند و در معرض جت‌های هوایی با نرخ جریان جرمی یکسان قرار می‌گیرند. در نمودار حالت ۱۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، تقریباً در هر سه زاویه ابتدا نزولی، سپس مقدار قطر متوسط ساوتر افزایش می‌یابد. در نمودار حالت ۲۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، تقریباً در زاویه ۳۰ درجه ابتدا نزولی، سپس مقدار قطر متوسط ساوتر افزایش می‌یابد و در زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه در تمامی ناحیه‌ها نسبتاً نزولی است. در نمودار حالت ۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، تقریباً در هر سه زاویه برخورد قطر متوسط ساوتر نزولی است. هنگامی که قطرات در جهت پایین‌دست محور Z حرکت می‌کنند، مقدار SMD نزدیک به محور به‌دلیل احتمال فروپاشی قطرات بیش‌تر در هنگام تعامل با جریان هوای اطراف و توزیع مجدد قطرات در پاشش اطراف، کاهش می‌یابد.



شدت جریان حجمی ۱۵۰ میلی لیتر بر دقیقه



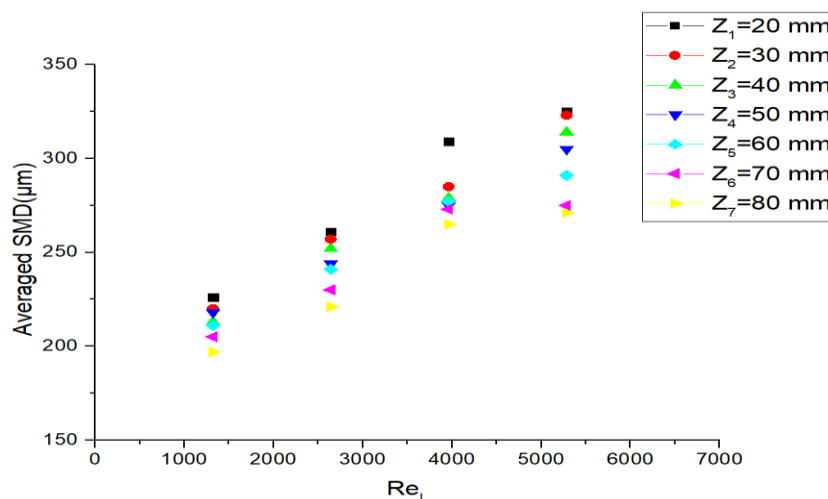
شدت جریان حجمی ۲۰۰ میلی لیتر بر دقیقه



شدت جریان حجمی ۲۵۰ میلی لیتر بر دقیقه

شکل ۴-۳۶- توزیع متوسط SMD در امتداد محوری پاشش در شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه در زوایای برخورد مختلف

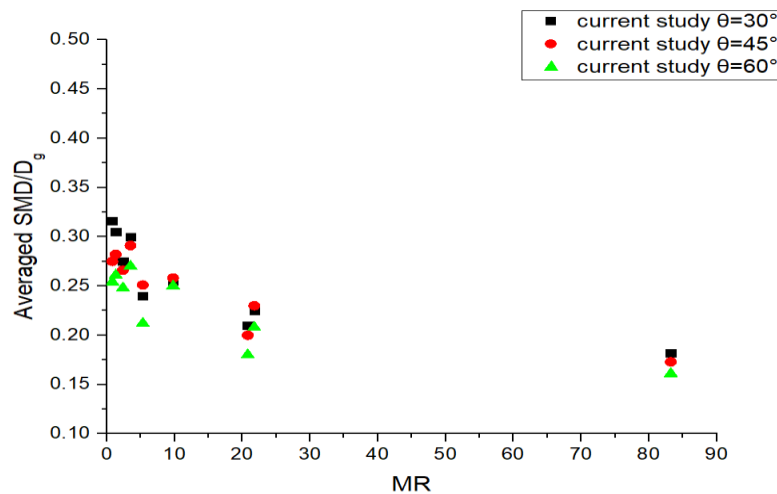
اندازه‌گیری‌هایی برای ثبت اندازه قطرات در وضعیت محوری‌های مختلف در پایین‌دست نقطه برخورد، در ۷ موقعیت محوری که ۱۰ میلی‌متر با شروع از مرکز پاشش فاصله دارند، انجام شد. اندازه‌گیری‌ها در نرخ جریان هوا ۱۵ گرم بر دقیقه در شدت جریان‌های آب مختلف ۵۰-۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، انجام شد. نتایج تعیین اندازه قطرات در شرایط مختلف در شکل ۴-۳۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۴-۳۷ نشان داده شده است، SMD با افزایش سرعت جت آب از ۳۳۵ میکرون به ۱۹۷ میکرون کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود که اندازه قطرات با افزایش سرعت جت آب افزایش می‌یابد. تغییراتی در اندازه قطرات با موقعیت محوری در راستای محور Z نیز مشاهده شده است. قطر قطرات در مرکز کم‌ترین مقدار را دارد و با حرکت به سمت لبه پاشش به صورت شعاعی افزایش می‌یابد. این تغییر در SMD با افزایش سرعت جت آب افزایش می‌یابد. اندازه‌گیری‌های اندازه قطرات در فاصله ۸۰ میلی‌متر در پایین‌دست نقطه برخورد کاهش اندازه قطرات را در جریان جت هوا نشان داد؛ در حالی که افزایش سرعت جت آب باعث افزایش اندازه قطرات شد.



شکل ۴-۳۷- متوسط SMD در عدد رینولدزهای آب و مکان‌های محوری مختلف

SMD متوسط اندازه‌گیری شده روی صفحه $Z=50$ میلی‌متر، برای شدت جریان‌های مختلف پاشش با مقادیر مختلف MR در شکل ۴-۳۸ نشان داده شده است. اعمال حذف اثر قطر انژکتور هوا، برای بدون بُعد شده کردن مقدار SMD با تقسیم بر قطر انژکتور هوا در شکل ۴-۳۸ نشان داده شده است. شکل ۴-۳۸

نسبت شار تکانه هوا به آب (MR) که در معادله ۴-۴ تعریف شده است را نشان می‌دهد. در اینجا مشخص شده است که با افزایش زاویه برخورد، SMD کاهش می‌یابد. این ممکن است به دلیل افزایش اندازه تکانه باشد که برای اتمیزه شدن در نقطه برخورد دسترس است. در زاویه ۳۰ درجه، مقدار بدون بُعد شده SMD به سرعت از مقدار ۰/۳۱۶ کاهش می‌یابد تا به مقدار تقریباً ثابتی در حدود ۰/۱۸۵ در مقدار MR برابر با ۸۳/۲۴ برسد. در زاویه ۴۵ درجه، مقدار بدون بُعد شده SMD به سرعت از مقدار ۰/۲۹ کاهش می‌یابد تا به مقدار تقریباً ثابتی در حدود ۰/۱۷۳ در مقدار MR برابر با ۸۳/۲۴ برسد. در زاویه ۶۰ درجه، مقدار بدون بُعد شده SMD به سرعت از مقدار ۰/۲۷۱ کاهش می‌یابد تا به مقدار تقریباً ثابتی در حدود ۰/۱۶۱ در مقدار MR برابر با ۸۳/۲۴ برسد. اندازه‌گیری‌های SMD در امتداد خط مرکزی در صفحه برخوردی در راستای محور $Z=50$ میلی‌متر هست. براساس نتایج به دست آمده می‌توان گفت در زاویه برخورد ۶۰ درجه اندازه قطرات تولید شده در اتمیزاسیون ثانویه در محور $Z=50$ میلی‌متر کوچک‌تر از حالت‌های زاویه برخورد ۳۰ و ۴۵ درجه می‌باشد؛ در نتیجه با افزایش زاویه برخورد، اتمیزه شدن بهبود می‌یابد. در کل شکل ۴-۳۸ نشان می‌دهد که اثر زاویه برخورد دو جت هوا و آب ناچیز نیست، به این معنی که زاویه برخورد اندازه کلی قطرات را تغییر می‌دهد. اهمیت زاویه برخورد مستلزم نیاز به پارامتری به غیر از MR است؛ زیرا در همان MR ساختار پاشش و اندازه قطره‌ها در زوایای برخورد مختلف متفاوت هستند. با این حال، افزایش نرخ جریان آب با منجر به افزایش درخور توجه انرژی ورودی به انرژی ورودی بسیار مهم است.

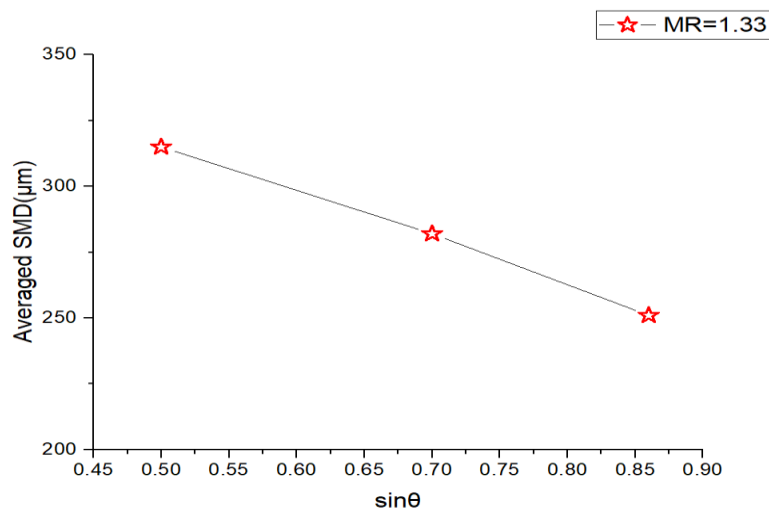


شکل ۴-۳۸- تغییر SMD برای زوایای برخورد مختلف بر حسب MR

جدول ۴-۸- تغییرات زاویه ای مقدار بدون بُعدشده و مقدار MR

درجه	مقدار MR	کاهش از مقدار	مقدار ثابت تقریبی
۳۰	۸۳/۲۴	۰/۳۱۶	۰/۱۸۵
۴۵	۸۳/۲۴	۰/۲۹	۰/۱۷۳
۶۰	۸۳/۲۴	۰/۲۷۱	۰/۱۶۱

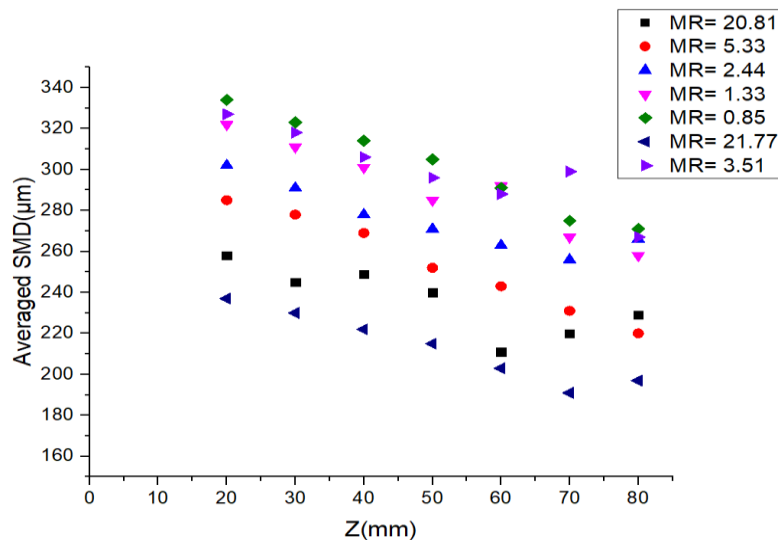
برای یافتن اثر زاویه برخورد بر SMD زاویه برخورد، بین دو جت تغییر می‌کند. زوایای انتخاب‌شده در محدوده ۳۰ تا ۶۰ درجه هستند. برای نشان دادن اهمیت جز نرمال، یک نمودار SMD با $\sin\theta$ در شکل ۴-۳۹ نشان داده شده است. شکل ۴-۳۹ برای یک MR ثابت عدد ۳۳/۱ که در آن وابستگی مرتبه اول آشکار است. مقدار سینوس زوایای برخورد ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب مقادیر ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۸۶ است؛ پس می‌توان نتیجه گرفت که در زوایای برخورد بزرگ‌تر نیرو و ضربه بیشتری جت هوای یکسان در نقطه برخورد به جت آب وارد می‌کند؛ در نتیجه، هرچه نیرو و فشار وارده در نقطه برخورد باعث فروپاشی زودتر و سریع‌تر جت آب می‌شود و قطرات ریزتری حاصل می‌شود. در زاویه برخورد ۶۰ درجه، لیگامنت‌های به وجود آمده، پس از فروپاشی جت آب در مرحله اتمیزاسیون اولیه زودتر به قطرات ریز تبدیل می‌شوند. لیگامنت‌ها رشته‌های نازکی هستند که بر اثر فروپاشی جت آب به وجود می‌آیند. عامل اصلی ریز شدن قطرات در این نمودار تغییر زاویه برخورد هست زیرا مقادیر شدت جرمی هوا و شدت حجمی آب ثابت است.



شکل ۴-۳۹- اثر سینوسی زاویه برخورد بر روی SMD

همان‌طور که پارامتر MR افزایش می‌یابد (شدت جریان جریان هوای زیاد) SMD در امتداد محور حداقل می‌شود و اندازه قطر قطره به تدریج در جهت محوری Z کاهش می‌یابد. همچنین از شکل ۴-۴۰ مشهود است که تا یک MR خاص، تغییرات محوری SMD یک‌روند نزولی را نشان می‌دهد. در نزدیک ترین حالت به نقطه برخورد شاهد بزرگ‌ترین قطر قطره در تمامی حالت‌ها هستیم. در کل این نمودار ترند خطی نزولی دارد. این نمودار نشان می‌دهد که افزایش فشار هوا، SMD را در کل ناحیه پاشش کاهش می‌دهد. کوچک‌ترین ناحیه SMD در طول بررسی پارامتر MR، محدوده SMD حدود ۱۹۰ میکرون در $Z=70$ میلی‌متر در $MR=21/77$ مشاهده می‌شود. افزایش شدت جریان آب با جریان هوای ثابت، قطرات بزرگ‌تری تولید می‌کند و در نتیجه، پاشش تولید در ناحیه دور از انژکتور با داشتن تکانه هوای کوچک‌تر ظاهر می‌شود و بر عکس افزایش شدت جریان هوا با جریان آب ثابت، قطرات کوچک‌تری تولید می‌کند. شکل ۴-۳۷ نشان می‌دهد که افزایش GLR مشابه با بیش‌تر شدت جریان هوا منجر به کاهش SMD در کل پروفایل محوری می‌شود. شیب تغییرات برای مقادیر $MR=5/33$ و $MR=0/85$ از سایر موارد بیش‌تر می‌باشد. هنگامی که قطرات در جهت پایین‌دست محور Z حرکت می‌کنند، مقدار SMD نزدیک به محور

به دلیل احتمال فروپاشی قطرات بیش تر در هنگام تعامل با جریان هوای اطراف و توزیع مجدد قطرات در پاشش اطراف، کاهش می یابد.

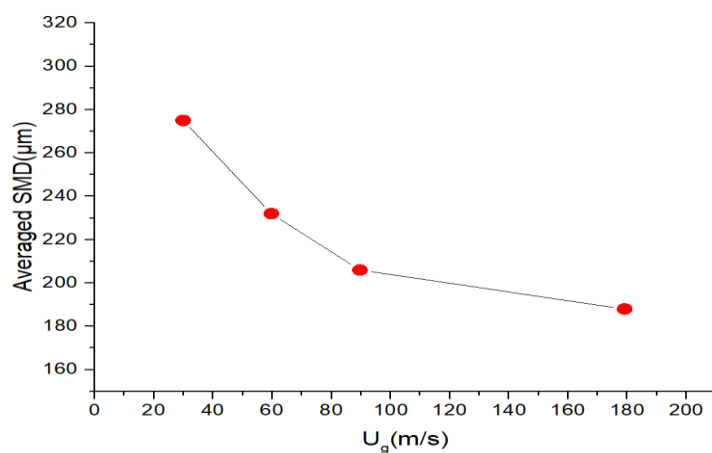


شکل ۴-۴ تغییرات محوری SMD پاشش

بنابراین توصیف پارامتری که کیفیت کلی پاشش را ارایه می دهد نسبتاً دشوار است. با این حال قبل از اینکه نفوذ رخ دهد مقدار SMD در ناحیه طول پاشش در راستای محور Z نسبتاً یکنواخت است که مؤلفه خوبی از کیفیت اتمیزاسیون پاشش خواهد بود. بنابراین، برای پیش بینی کیفیت اتمیزاسیون پاشش باید تمام پارامترهایی از قبیل زاویه برخورد، اندازه تکانه، شدت جریان های مختلف و هندسه انژکتور بررسی کرد؛ با توجه به اینکه SMD با سرعت جت آب افزایش می یابد، به صورت خطی با سرعت جت هوا و زاویه $\sin\theta$ کاهش می یابد، اندازه تکانه هوا به آب به عنوان پارامتر مطلوب انتخاب شده است.

شکل ۴-۴۱ مقایسه قطره SMD را به عنوان تابعی از سرعت هوا در نقطه برخورد $Z=60$ میلی متر برای پیکربندی انژکتور هوا در نظر گرفته شده که در این مطالعه، ارائه شده است. قطر انژکتور آب برای این مجموعه از آزمایش ها ۱ میلی متر است و سرعت خروج جت آب ۳/۹۹ متر بر ثانیه است. کاهش تقریباً زیادی در قطر متوسط قطرات ساوتر SMD از مقدار ۲۷۵ میکرون به ۱۸۸ میکرون برای انژکتور هوای برخوردی مشاهده می شود. افزایش سرعت هوا اثر زیادی بر فروپاشی اولیه جت آب دارد که نتیجه، این عمل باعث

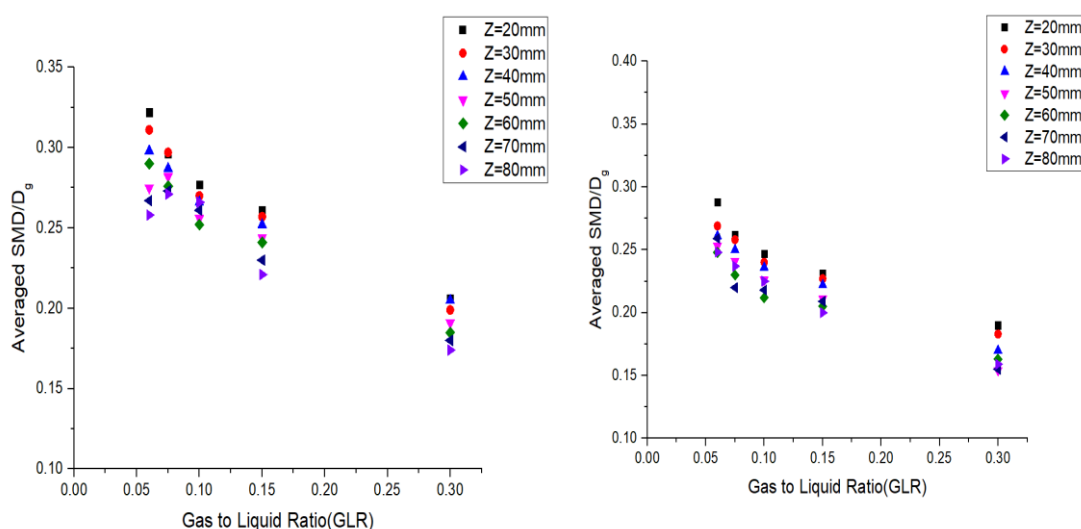
تولید قطرات ریزتر در فروپاشی ثانویه هست. با افزایش سرعت هوا در نقطه برخورد از ۲۹/۸۵ به ۱۷۹/۱ متر بر ثانیه، کاهش نسبتاً زیادی در مقدار متوسط SMD مشاهده می‌شود و به نظر می‌رسد که دلیل این کار ناشی از کاهش بیش‌تر ضخامت صفحه آب تشکیل شده در نقطه برخورد است. در حقیقت هرچه ضخامت صفحه آب تشکیل شده کاهش پیدا کند، فروپاشی آن راحت‌تر انجام شده و قطرات ریزتری حاصل می‌شود. نمودار زیر به صورت خطی کاهش پیدا می‌کند. میزان تغییرات کاهش قطر متوسط SMD در سرعت‌های ۸۹/۵۵ تا ۱۷۹/۱ متر بر ثانیه کمتر شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت هوا از ۲۹/۸۵ به ۵۹/۷ متر بر ثانیه، مقدار قطر متوسط ساوتر از ۲۷۵ به ۲۳۲ میکرون می‌رسد که بیش‌ترین کاهش شیب نمودار را شاهد هستیم. شیب تغییرات خطی در شدت جریان ۱۵ گرم بر دقیقه نسبت به شدت جریان‌های دیگر بیش‌تر است.



شکل ۴-۴۱- تأثیر سرعت‌های مختلف گاز در شدت جریان ثابت آب بر روی اندازه قطرات

برای از بین بردن اثر قطر انژکتور خروجی هوا، مقدار SMD بدون بعد با تقسیم SMD متوسط بر قطر انژکتور خروجی هوا محاسبه می‌شود. از آن جا که اتمیزه شدن کامل آب از شدت جریان حجمی آب ۵۰-۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه در شدت جریان‌های جریان هوا ۱۵ و ۳۰ گرم بر دقیقه مشاهده شد، اندازه‌گیری اندازه قطرات، تنها در این شرایط انجام گرفت. نتایج اندازه‌گیری اندازه قطرات برای پاشش در شدت جریان‌های مختلف جریان هوا در شکل ۴-۴۲ نشان داده شده است. در شکل ۴-۴۲ تغییرات محوری در راستای

Z در SMD در همه شرایط مشاهده می‌شود. در نرخ جریان هوا ۱۵ گرم بر دقیقه و GLR حدود مشاهده می‌شود که به دلیل سرعت پایین تر جت آب مقدار SMD دارای بیشترین مقدار خود است. افزایش GLR منجر به قطرات کوچکتر در مرکز پاشش و SMD بزرگتر در لبه‌های بیرونی پاشش شد. تفاوت در تغییرات محوری توزیع قطرات با GLR به دلیل تغییر در حالت اتمیزاسیون است؛ از سوی دیگر در GLR های بالاتر، اندازه تکانه بالاتر جت هوا باعث می‌شود که جت آب قبل از برخورد، به سرعت اتمیزاسیون شود. افزایش شدت جریان جرمی ۳۰ گرم بر دقیقه مقادیر SMD را در تمامی محورهای Z همان‌طور که در شکل ۴-۴۲ نشان داده شده است، کاهش می‌دهد.



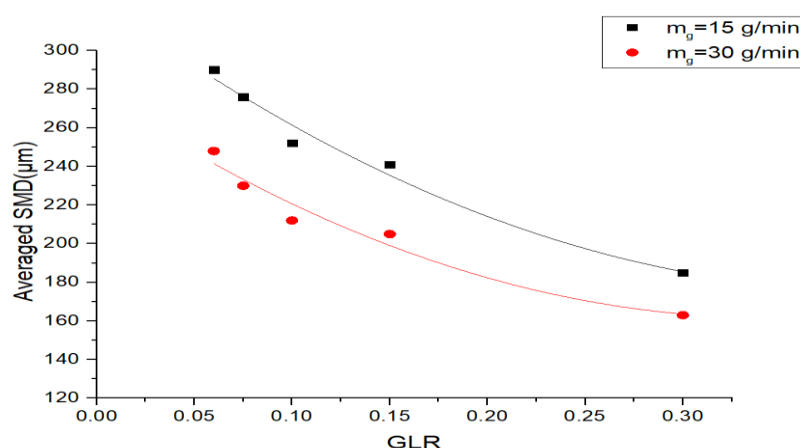
شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه

شدت جریان جرمی ۳۰ گرم بر دقیقه

شکل ۴-۴۲ تغییر متوسط SMD بر حسب GLR

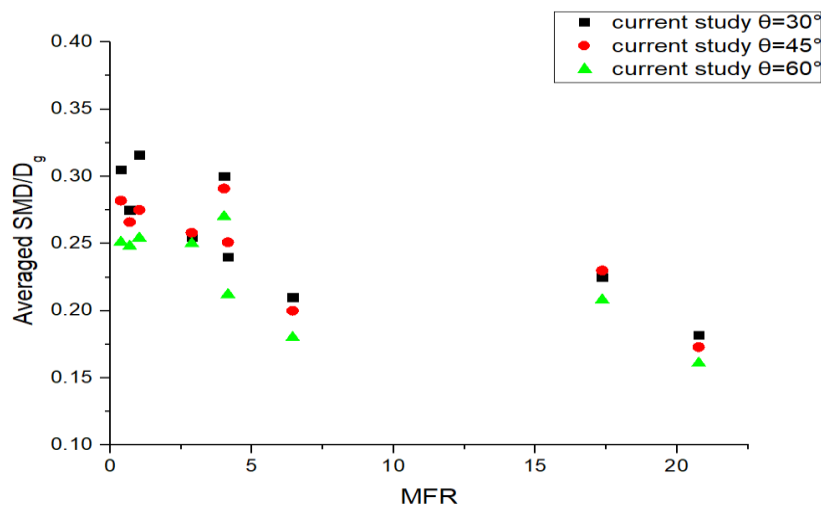
SMD متوسط با ترکیب آمار قطرات در تمام موقعیت‌های محور در راستای ۶۰ میلی‌متری پایین دست نقطه برخورد محاسبه شد. داده‌های مربوط به آب در سرعت‌های مختلف جریان هوا در شکل ۴-۴۳ نشان داده شده است. با توجه به اینکه در نرخ جریان هوای ۱۵ گرم بر دقیقه با افزایش GLR، SMD کلی را کاهش می‌دهد. در حالت شدت جریان جرمی ۳۰ گرم بر دقیقه، به دلیل سرعت بیشترین هوا در نقطه برخورد جت آب سریع‌تر به فروپاشی می‌رسد و پیش‌بینی می‌شود که لیگامنت‌ها به قطرات ریزتری تبدیل

شوند. مقدار قطر متوسط ساوتر در مقادیر مختلف GLR به صورت نمایی کاهش پیدا می کند. برای مثال در یک شدت جریان ثابت آب مثلاً ۱۵۰ میلی لیتر بر دقیقه، مقدار GLR شدت جرمی هوای ۳۰ گرم بر دقیقه بیش تر از مقدار شدت جرمی هوای ۱۵ گرم بر دقیقه است پس در نتیجه، در مقدار ۳۰ گرم بر دقیقه فشار بیش تری در نقطه برخورد ایجاد می شود. سرعت بیش تر جریان هوا برابر است با ایجاد ناپایداری های بیش تر در نقطه برخورد.



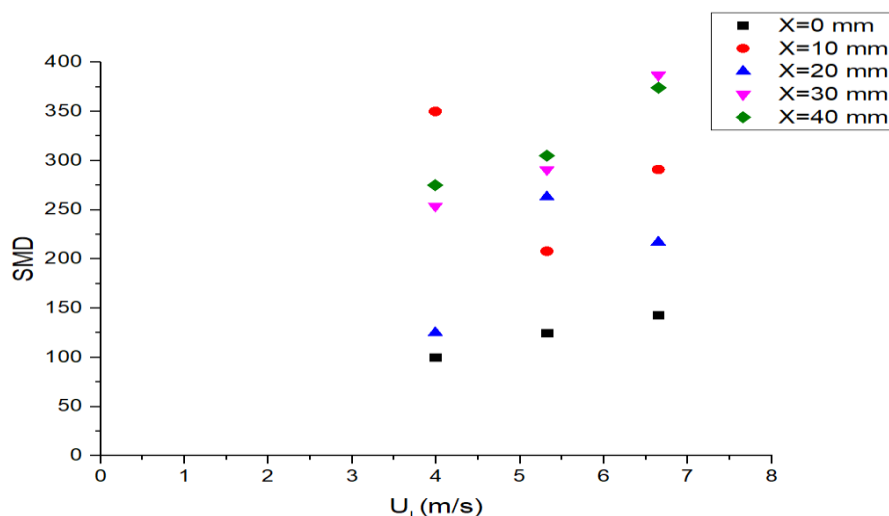
شکل ۴-۴۳- تغییر متوسط SMD بر حسب GLR در شدت جریان ۱۵۰ میلی لیتر بر دقیقه

مقادیر بدون بعد SMD به عنوان تابعی از پارامترهای بدون نسبت شار اندازه تکانه هوا به آب (MFR) در شکل ۴-۴۴ نشان داده شده است. نسبت شار تکانه با در نظر گرفتن شار تکانه در نقطه برخورد محاسبه می شود. جالب توجه است که نتایج نشان می دهند که مقادیر SMD بدون بعد برای آب با شدت جریان های مختلف، روند مشخصی را با هر دو نسبت شار اندازه تکانه هوا به آب نشان می دهند. در زاویه ۳۰ درجه، شاهد قطرات بزرگ تر نسبت به زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه هستیم. پس در نتیجه، زاویه برخورد بر اندازه قطرات تأثیر دارد که قابل کتمان نیست. در $MFR > 5$ تغییرات اندازه قطرات تقریباً ثابت باقی می ماند. در $MFR < 5$ تأثیر نفوذ شدت جریان جرمی هوا در جت آب بسیار بیش تر است که در نتیجه، شاهد تغییرات قطرات به اندازه های مختلفی هستیم. هر چه به اعداد بزرگ تری از MFR می رسیم که اندازه قطرات به تدریج کاهش پیدا می کند.



شکل ۴-۴۴- تغییر متوسط SMD بر حسب MFR در زوایای برخورد مختلف

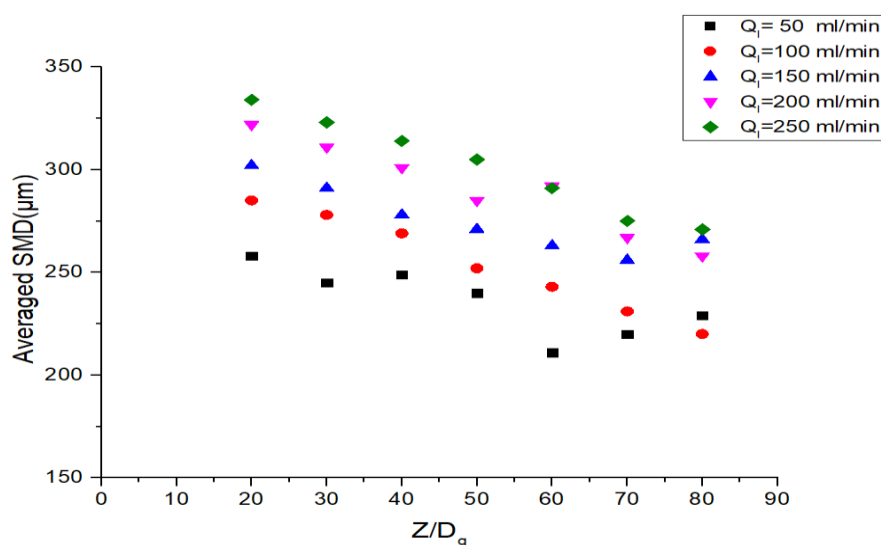
اندازه‌گیری‌های اندازه قطرات در موقعیت محوری ۶۰ میلی‌متر در پایین‌دست نقطه برخورد در چهار موقعیت شعاعی که ۱۰ میلی‌متر با شروع از مرکز پاشش فاصله دارند، انجام شدند. اندازه‌گیری‌ها در نرخ جریان هوا ۱۵ گرم بر دقیقه و ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه انجام شد. نتایج تعیین اندازه قطرات در شرایط مختلف سرعت آب در شکل ۴-۴۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که اندازه قطرات با افزایش سرعت جت آب افزایش می‌یابد. تغییراتی در اندازه قطرات با موقعیت شعاعی نیز مشاهده شده است. قطر قطرات در مرکز کم‌ترین مقدار را دارد و با حرکت به سمت لبه پاشش به صورت شعاعی افزایش می‌یابد. این تغییر در SMD با افزایش سرعت جت آب افزایش می‌یابد. علاوه بر این، تفاوت در SMD پاشش در موقعیت‌های شعاعی مختلف در سرعت جت آب بالاتر کاهش می‌یابد. اندازه‌گیری‌های اندازه قطرات در فاصله ۶۰ میلی‌متر در پایین‌دست نقطه برخورد کاهش اندازه قطرات با افزایش جت هوا شاهد هستیم؛ در حالی که افزایش سرعت جت آب باعث افزایش اندازه قطرات شد.



شکل ۴-۴۵- تغییرات مقدار SMD در سرعت‌های مختلف آب در راستای محور شعاعی

برای مطالعه اثر شدت جریان آب بر توزیع اندازه قطرات، متوسط مقدار SMD در امتداد محور عمودی Z اندازه‌گیری شده و در شکل ۴-۴۶ نشان داده شده است. شکل ۴-۴۶ نشان می‌دهد که متوسط مقدار SMD برای چندین شدت جریان آب زمانی که شدت جریان جرمی هوا برابر با ۱۵ گرم بر دقیقه برای ۳۰ زاویه برخورد هست. می‌توان مقادیر بالاتر SMD را برای نرخ‌های جریان آب بالاتر مشاهده کرد. علاوه بر این، برای هر شدت جریان، قطر قطره با فاصله محوری کاهش می‌یابد و دوباره، فراتر از فاصله تقریباً ۵۰ میلی‌متر نقطه، برخورد افزایش می‌یابد. برای شدت جریان ۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه در فاصله محوری ۸۰ میلی‌متر شاهد افزایش اندک اندازه قطره هستیم. برای شدت جریان ۲۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه تا فاصله محوری ۸۰ میلی‌متر شاهد کاهش به‌مرور اندازه قطره هستیم. برای شدت جریان ۱۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه در فاصله محوری ۸۰ میلی‌متر شاهد افزایش اندازه قطره هستیم. برای شدت جریان ۱۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه تا فاصله محوری ۸۰ میلی‌متر شاهد کاهش به‌مرور اندازه قطره هستیم. برای شدت جریان ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه به‌شدت جریان‌های دیگر شاهد نوسان بیش‌تری در اندازه قطرات تولید شده هستیم. در ابتدا تا فاصله محوری ۴۰ میلی‌لیتر افزایش قطر داریم و دوباره تا ۶۰ میلی‌متر کاهش قطر و سپس افزایش قطر تا فاصله محوری ۸۰ میلی‌متر حدود عدد ۲۵۰ میکرون هستیم. در هر حالت بیش‌ترین اندازه قطرات را در فاصله محوری

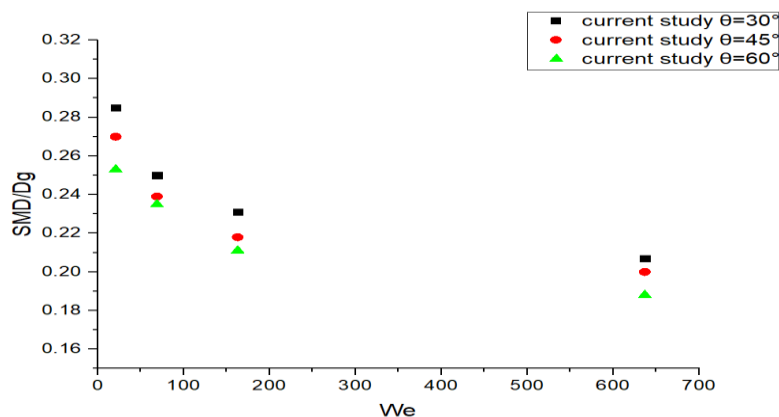
۲۰ میلی‌متر داریم به دلیل اینکه جت آب، پس از برخورد جت هوا فرو می‌پاشد (اتمیزاسون اولیه) در ابتدا اندازه قطرات بزرگ‌ترین حالت خود در نزدیکی نقطه برخورد هستند. هنگامی که قطرات در جهت پایین‌دست محور Z حرکت می‌کنند، مقدار SMD نزدیک به محور به دلیل احتمال فروپاشی قطرات بیش‌تر در هنگام تعامل با جریان هوای اطراف و توزیع مجدد قطرات در پاشش اطراف، کاهش می‌یابد. بنابراین جت هوا جت‌های برخوردی را قادر می‌کند تا قطرات کوچک‌تر با سرعت متوسط جت آب تولید کنند.



شکل ۴-۴۶- توزیع متوسط SMD در راستای محور عمودی Z در شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه

همان‌طور که در شکل ۴-۴۷ ملاحظه می‌شود، با افزایش عدد وبر که نشان‌دهنده برتری نیروهای اینرسی بر نیروهای کشش سطحی آب است، اندازه قطر متوسط بدون بعد ساوتر همراه با کاهش است. هم‌چنین با افزایش عدد وبر مقدار ضخامت صفحه جت آب تشکیل شده کاهش پیدا کرده و در نتیجه فروپاشی جت آب راحت‌تر انجام می‌گیرد. در اعداد وبر پایین‌تر به دلیل سرعت پایین جت هوا در نقطه برخورد، در اتمیزاسیون اولیه، هنگام فروپاشی صفحه آب شاهد ضخامت نسبتاً زیادی از صفحه آب داریم. علاوه بر این، نبودن نوسانات صفحه جتهای باعث کاهش تبادل تکانه بین هوا و آب شده و در نتیجه، قطرات بزرگ‌تری را تولید می‌کند. متوسط SMD بدون بعد با افزایش عدد وبر به دلیل فعل و انفعال قوی ناشی از اختلاف سرعت بین هوا و سرعت جت آب به صورت نمایی کاهش می‌یابد. زاویه برخورد نیز به اتمیزه شدن جت آب کمک

می‌کند و تأثیر آن با افزایش عدد وبر ضعیف می‌شود. افزایش سرعت جت هوا نقش به سزایی در ریزتر شدن قطرات تولیدشده دارد. همچنین افزایش عدد وبر گاز باعث تولید سریع‌تر قطرات ریزتر می‌شود که این امر با توجه به افزایش سرعت جریان هوا و به دنبال افزایش نیروی آیرودینامیک واردشده به آب کاملاً طبیعی است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود که با زیاد شدن مقدار عدد وبر که در واقع، نشان‌دهندهٔ افزایش نیروهای اینرسی به نیروهای کشش سطحی آب است منجر به کاهش SMD بدون بعد می‌شود. در واقع افزایش سرعت جت هوا، نیروهای اینرسی افزایش یافته و در برابر نیروهای کشش سطحی غالب می‌شوند. افزایش عدد وبر به مفهوم بالارفتن نیروهای ناپایدار کننده آب نسبت به نیروهای کشش سطحی است. با رسم نمودار SMD/D_g بر حسب عدد وبر گازی رابطه‌نمایی حاصل می‌شود که در هر سه زاویه برخورد کاهش پیدا می‌کند. مقدار قطر متوسط ساوتر در عدد وبر ۲۱، در حداکثر مقدار خود در زاویه برخورد ۳۰ درجه حدود ۰/۲۸۳ است که با افزایش به عدد وبر ۶۳۹، عدد بدون بعد به ۰/۲۰۲ کاهش پیدا می‌کند.



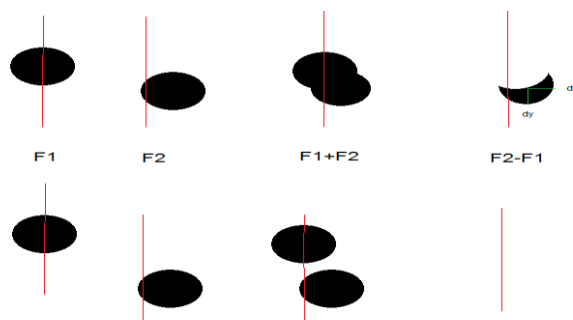
شکل ۴-۴۷- توزیع مقدار SMD بدون بعد بر حسب عدد وبر

۴-۷- متوسط سرعت قطرات

برای بررسی مبحث سرعت میانگین برای ذرات با تعداد زیاد، از روش آماری به صورت زیر استفاده شد. روش کار به این صورت است که در هر فریم ذرات آنالیز می‌شود و اندازه ذرات مشخص می‌شود. سپس هر فریم

با فریم بعدی جمع می‌شود و تصویر به‌دست آمده از جمع این دو فریم پشت سرهم دوباره به‌عنوان ذره، آنالیز می‌شود تا میزان افزایش طول ذرات به‌دست بیاید. جواب‌های به‌دست آمده برای افزایش طول در دو راستای افقی و عمودی برای بیشینه‌ترین حالت و کمینه‌ترین حالت و همچنین میانگین مربعات آن از مقدار عددهای به‌دست آمده مشابه، برای فریم اصلی کم می‌شود در اینجا عدد باقی‌مانده، مقدار جابه‌جایی هست که ذرات در این بازه فریم‌ها انجام داده‌اند و می‌توان از آن تخمینی برای سرعت ذرات داشته باشیم.

از طرفی علت وجود دو فریم که از هم کم شده ولی آنالیز انجام نشده، این هست که در با این روش اندازه ذرات تولیدشده، حاصل از تفریق بسیار کوچک می‌شود که امکان خطا در آنالیز طول را برای به‌دست آوردن سرعت افزایش می‌دهد؛ لذا دو فریم باهم جمع و سپس نتیجه طول‌ها از نتایج طول تصویر اول کم می‌شود. محدودیت این روش برای سرعت‌های بالاتری است که امکان هم‌پوشانی جابجایی ذرات بین دو فریم وجود نداشته باشد. شکل ۴-۴۸ محدودیت را نشان می‌دهد. تصویر پایین در حالی نشان می‌دهد که سرعت حرکت ذره در حدی زیاد بوده که امکان هم‌پوشانی برای استفاده از الگوریتم بالارو غیرممکن می‌کند.



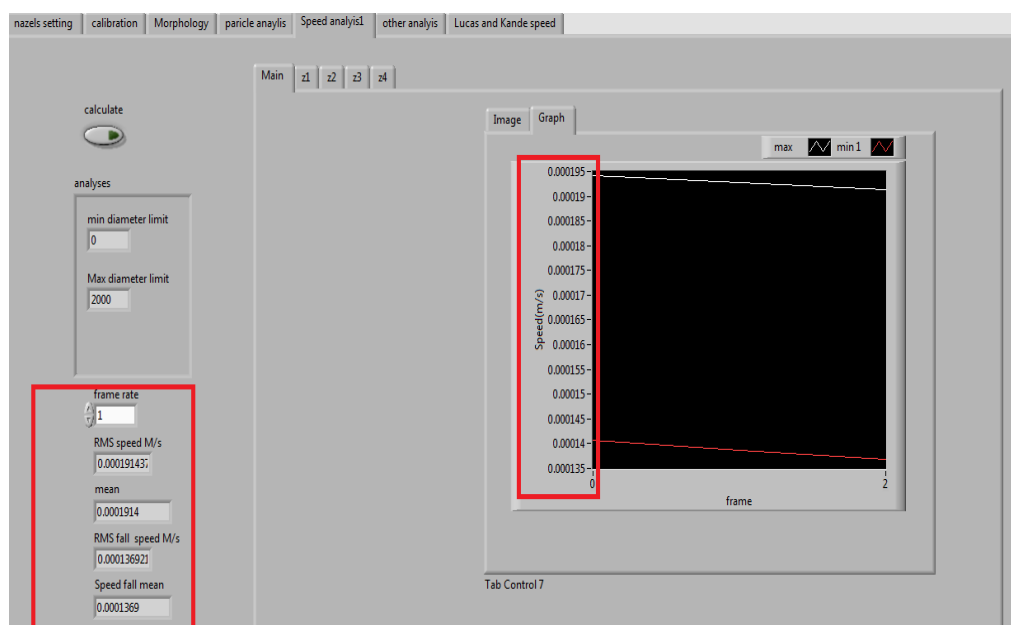
شکل ۴-۴۸- نحوه به‌دست آوردن سرعت قطرات

برای بررسی صحت کارکرد نرم افزار در این مورد هم چهار قطره به سایز یک میلی‌متر طراحی شد که در سه فریم هر بار ۱۵۰ میکرون به سمت پایین جابه‌جا گردید. تصاویر زیر مربوط به این تست می‌باشد.



شکل ۴-۴۹- قطرات طراحی شده برای اعتبارسنجی

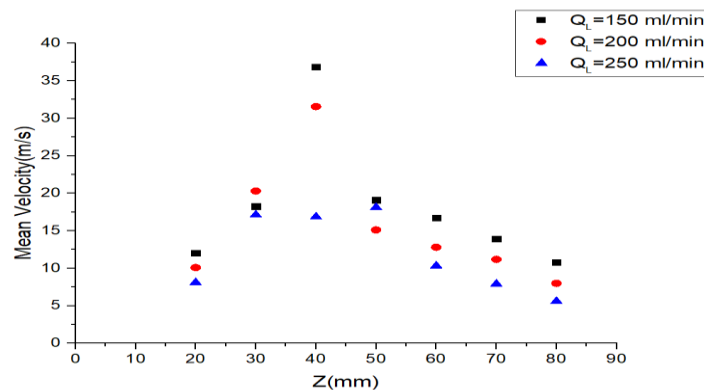
نتایج به دست آمده برای این مورد به صورت زیر قابل مشاهده است که در آن، فریم ریت یک نمونه بر ثانیه گرفته شد تا اعداد قابل درک تر باشند.



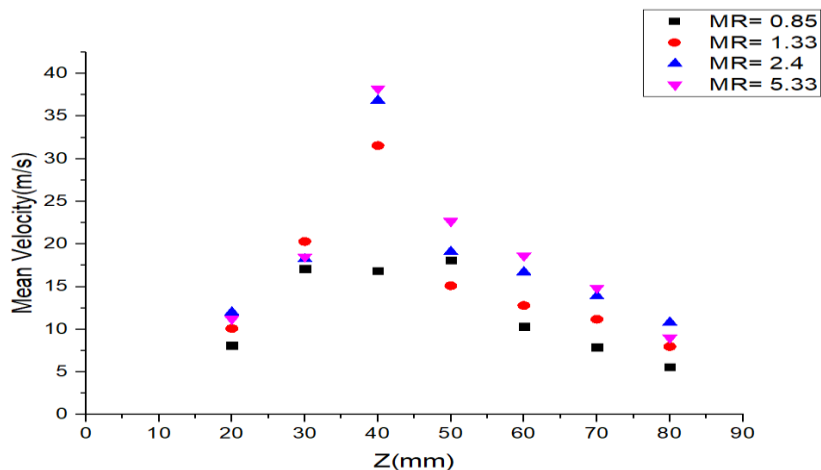
شکل ۴-۵۰- اجرای نرم افزار برای به دست آوردن نتایج سرعت قطره

سرعت به دست آمده باید مقدار 0.00015 متر بر ثانیه باشد که نرم افزار 0.000135 تا 0.000195 را برای این مورد تخمین زده که با توجه به محدودیت رزولوشن $7/4$ میکرونی برای مقدار دقت نزدیک و قابل قبول برای سرعت است.

تغییرات سرعت متوسط قطرات در امتداد خط مرکزی پاشش برای شدت جریان های مختلف آب و GLR مختلف در شکل ۴-۵۱ گزارش شده است؛ به طور کلی، سرعت در امتداد خط مرکزی در فاصله ۲۰ میلی متری از نقطه برخورد افزایش یافت. در پایین دست ناحیه برخورد، صفحه آب و لیگامنت ها توسط نیروهای تکانه هوا تحریک می شوند و در نتیجه، سرعت به حداکثر مقدار $37/5$ متر بر ثانیه در فاصله ۴۰ میلی متری نقطه برخورد دو جت می رسد. در فاصله $Z=50$ تا $Z=80$ میلی متر، قطرات کوچک تر برخورد می کنند و قطرات بزرگ تر تشکیل می دهند سپس نیروی تکانه به تدریج کاهش پیدا می کند. بنابراین، سرعت قطرات شروع به کاهش از انژکتور می کند.



شکل ۴-۵۱- متوسط سرعت قطرات در شدت جریان‌های مختلف آب در شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه افزایش سرعت محوری متوسط خط مرکزی قطرات واقع در امتداد محور پاشش تا $Z=50$ میلی‌متر در شکل ۴-۵۲ نشان داده شده است. شاهد کاهش سرعت محوری متوسط از $Z=50$ تا $Z=80$ میلی‌متر هستیم. در نرخ جریان جرمی هوای ثابت ۱۵ گرم بر دقیقه، هرچه قدر شدت جریان حجمی آب افزایش یابد، اندازه متوسط سرعت محوری دچار کاهش می‌شود. پارامتر اصلی تأثیرگذار به روی سرعت محوری متوسط، سرعت جت هوا است. افزایش سرعت گاز در نقطه برخورد دو جت، باعث افزایش نفوذ تکانه پاشش است که این امر منجر به افزایش سرعت قطرات خواهد شد. شکل ۴-۵۳ نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از خروجی انژکتور و نقطه برخورد تا $Z=50$ میلی‌متر، ابتدا سرعت افزایش و سپس کاهش می‌یابد که ناشی از انبساط جت هوا و افزایش مقاومت هوا است. با این حال، شدت جریان آب تأثیر کمتری بر سرعت قطرات در محور خط مرکزی به‌ویژه در پایین دست پاشش دارد.



شکل ۴-۵۲- متوسط سرعت قطرات در GLRهای مختلف

۴-۸- شار حجمی مایع

به مقدار حجم پاشش شده از خروجی انژکتور در یک پالس زمانی خاص، شار حجمی مایع گفته می‌شود. در این آزمایش‌ها، مقدار حجم آب خارج شده از انژکتور و برخورد آن با حجم هوا در یک نقطه اندازه‌گیری شد. پاشش آب تولیدشده، توسط جت هوا و آب در یک پالس زمانی خاصی اندازه‌گیری می‌شود. مقدار پاششی که در ته استخر طراحی شده، تولید می‌شود براساس پالس زمانی ۱۰ و ۱۵ ثانیه، توسط وسایل آزمایشگاهی مناسب مانند بشر حجم آب اندازه‌گیری شد. این آزمایش‌ها در شدت جریان‌های ۵۰-۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه و شدت جریان‌های جرمی هوا ۵ و ۱۵ گرم بر دقیقه انجام شد.

جدول ۴-۹- مقدار شار حجمی اندازه‌گیری پاشش برحسب GLR در شدت جریان ۵ گرم بر دقیقه

شدت جریان جرمی هوا (g/min)	۵	۵	۵	۵	۵
شدت جریان حجمی آب (ml/min)	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰
GLR	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۳۳	۰/۰۲۵	۰/۰۵
شار حجمی مایع-۱۰ ثانیه (ml/cm ² . s)	۸	۱۴/۵	۲۲	۳۲	۴۰/۵
شار حجمی مایع-۱۵ ثانیه (ml/cm ² . s)	۱۱/۵	۲۲	۲۹/۵	۴۵	۵۸

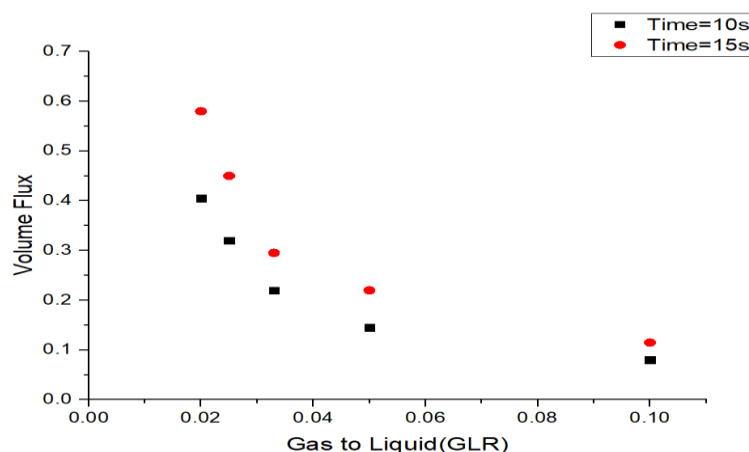
جدول ۴-۱۰- مقدار شار حجمی اندازه‌گیری پاشش برحسب GLR در شدت جریان ۱۵ گرم بر دقیقه

شدت جریان جرمی هوا (g/min)	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
شدت جریان حجمی آب (ml/min)	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰
GLR	۰/۳	۰/۱۵	۰/۱	۰/۰۷۵	۰/۰۶
شار حجمی مایع-۱۰ ثانیه (ml/cm ² . s)	۶	۱۱	۱۸	۲۷/۵	۳۶
شار حجمی مایع-۱۵ ثانیه (ml/cm ² . s)	۹	۱۹/۵	۲۶	۳۹	۵۰

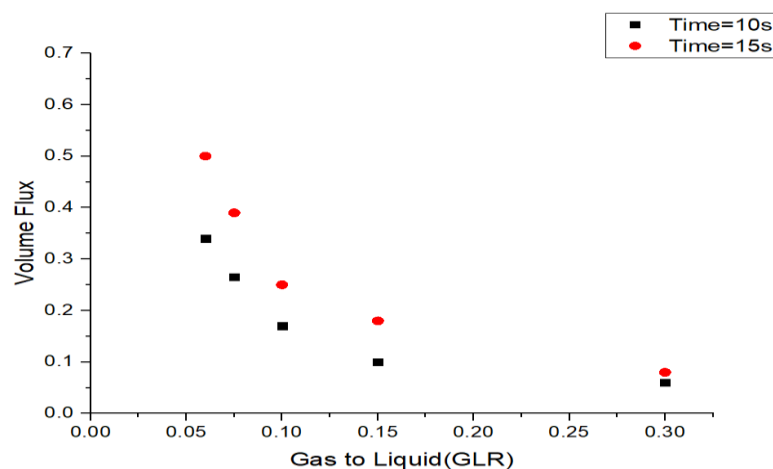
افزایش پارامتر GLR با افزایش شدت جریان جرمی هوا و کاهش شدت جریان حجمی آب همراه است.

در نتیجه با کاهش شدت جریان حجمی آب، مقدار حجم خروجی آب از سر خروجی انژکتور کاهش می‌یابد؛

یعنی هرچه مقدار شدت جریان حجمی آب کم و شدت جریان جرمی هوا زیاد شده باشد، مقدار GLR زیاد شده و حجم آب خروجی کاهش می‌یابد. در این آزمایش‌ها با افزایش زمان پاشش، حجم آب خروجی به‌صورت نمایی در نمودار کاهش می‌یابد که نشان دهنده بهینه بودن عملکرد انژکتورها است؛ زیرا با افزایش مدت زمان پاشش انژکتور، بیش‌تر حجم آب بیش‌تری از انژکتور خارج می‌شود و این روند افزایش حجم به‌طور متناسب و معین زیاد شده است. همان‌طور که ذکر شد در این‌بخش مقدار شار حجمی آب توسط یک بشر مدرج، پس از خروج آب از سر انژکتور و برخورد آن با جت هوا، برحسب پالس‌های زمانی ۱۰ و ۱۵ ثانیه پاشش که توسط تایمر اندازه گرفته شد. فاصله بین تزریق پاشش و کف‌استخر ۴۰ سانتی‌متر است. توزیع مکانی پاشش، شکل حجمی الگوی پاشش خروجی انژکتورها هست.



الف) ۵ گرم بر دقیقه



ب) ۱۵ گرم بر دقیقه

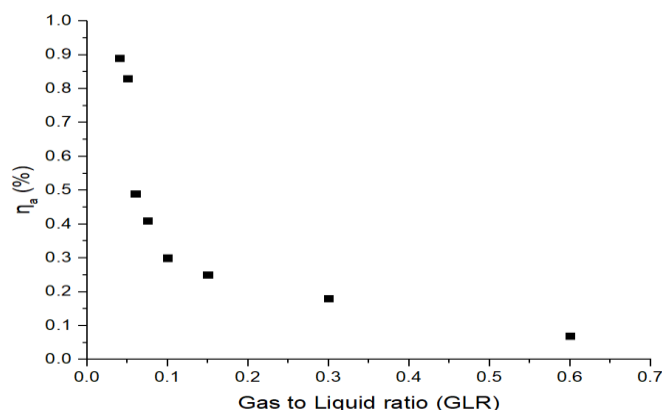
شکل ۴-۵- تغییرات شار حجمی بر اساس شدت جریان جرمی ۵ و ۱۵ گرم بر دقیقه بر حسب GLR

۴-۹- بازده اتمیزاسیون و کاربرد آن در پاشش‌های به کمک هوا

با توجه به کاربرد بازده اتمیزاسیون در پاشش‌های سوخت، شامل بررسی روی انژکتور برخوردی با استفاده از یک منبع انرژی گازی برای کمک به فرآیند اتمیزاسیون توسط جریان هوا و چند جت برخورد متمرکز است. درباره اتمیزاسیون مایع ناشی از برخورد چند جت برخوردی با یا بدون جریان هوا، مساحت کلی مایع توده قبل از اتمیزاسیون به تعداد جت‌های برخوردی بستگی دارد. بازده اتمیزه شدن در معادله (۴-۷) بیان شده است. هدف اتمیزاسیون چند جت برخوردی تولید قطرات با شدت جریان جرمی کمتر به اندازه یک یا دومرتبه است. با این حال با در نظر گرفتن افزایش در انرژی در دسترس، این روش اتمیزاسیون تنها، در صورتی منطقی است که اندازه قطرات به طور قابل توجهی کاهش یابد. در استراتژی‌های اتمیزه کردن به کمک هوا، جریان هوای ثانویه یک نیروی اضافی خارجی یا داخلی را برای ارتقا فرآیند فروپاشی مایع تولید می‌کند. رابطه اتمیزاسیون شامل پارامترهایی برای تولید قطرات از کوچک‌ترین اندازه D_{32} ، سرعت جریان آب U_J ، سرعت جریان هوا U_A ، قطر انژکتور D_J ، نسبت شدت جریان هوا به آب GLR، چگالی آب ρ_L و کشش سطحی بین هوا و آب σ_L است.

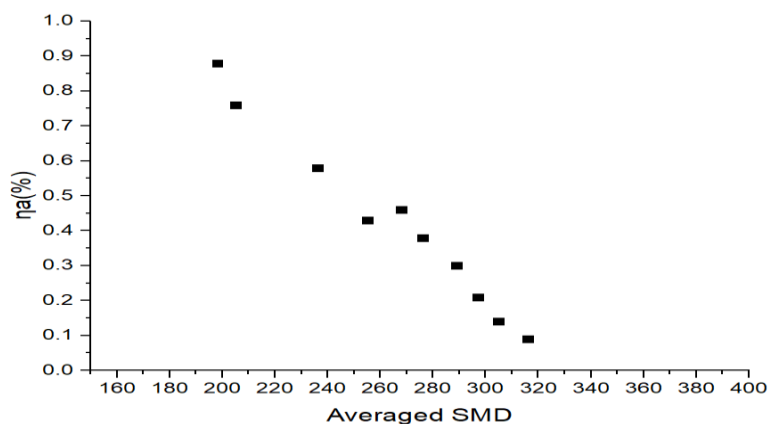
$$\eta_a = \frac{\sigma_L}{\rho_L} \left(\frac{4}{U_J^2 + GLR \cdot U_A^2} \right) \left[\frac{3}{D_{32}} - \frac{2}{D_J} \right] \quad (4-7)$$

بازدهی انژکتورهای جت برخوردی به کمک هوا برای آب در چندین GLR با استفاده از رابطه بالا محاسبه شده است. انژکتور هوا، بازده اتمیزه شدن در ابتدا در مقدار حداکثر خود قرار دارد و سپس به سرعت کاهش پیدا می‌کند. در مقادیر GLRهای بالاتر، هوای اتمیزه‌کننده انرژی بسیار بیش‌تری نسبت به مورد نیاز حمل می‌کند؛ در نتیجه بازده پایین است. هم‌چنین در GLRهای پایین‌تر، اتمیزه شدن عمدتاً به دلیل برخورد جت آب رخ می‌دهد و در نتیجه، استفاده از انرژی هوا کمتر است. حداکثر بازده در مقدار پارامتر GLR از ۰/۰۴ برای این آزمایش اتفاق افتاد. بیش‌ترین مقدار بازده اتمیزه شدن عدد ۰/۸۹ است. تغییر در SMD در GLRهای بالاتر، کمتر است.



شکل ۴-۵۴- بازده اتمیزاسیون با انژکتور هوا

با توجه این نمودار، GLR بالاتر منجر به کوچک تر شدن اندازه قطرات می شود و این امر نشان دهنده، افزایش عملکرد انژکتور است. برای توضیح اینکه در عملکرد اتمیزه شدن می توان ملاحظات نظری درباره حداقل d_{32} را که به دست آمده، در صورتی که انژکتور با عملکرد کامل کار کند، دنبال کرد. نحوه عملکرد بازده انژکتور، به معنی استفاده از تمام انرژی موجود در ورودی انژکتور برای تبدیل حجم آب موردنظر به قطرات ریز و عملکرد انژکتور، بستگی به فشارهای دینامیکی ورودی انژکتور دارد. بیش ترین بازده موجود مربوط به عدد $0.89/$ درصد در قطر حدود 190 میکرون است. با بزرگ تر شدن قطر قطرات شاهد کاهش میزان بازدهی تا قطر حدود 250 میکرون هستیم سپس در مقدار قطر 265 میکرون شاهد افزایش بازدهی هستیم. از مقادیر قطر 265 میکرون به بالا دوباره شاهد کاهش بازدهی هستیم. پس در نتیجه با توجه با رابطه ۴-۷ هرچه قطرات کوچک تری در رابطه قرار دهیم شاهد بازدهی بیش تری هستیم.



شکل ۴-۵۵- حداقل قطر متوسط ساوتر (d_{32}) براساس بازده اتمیزاسیون

۴-۹-۱ بازده اتمیزاسیون و کاربرد آن در پاشش‌های به کمک هوا همراه با عملکرد

بازده انژکتور بین انرژی حجمی مورد استفاده برای تبدیل یک مایع توده‌ای به قطرات با حجم انرژی خروجی از انژکتورهای جت‌های برخوردی چندگانه است درواقع در هنگام برخورد انژکتورهای مایع با جت گاز با مقایسه فشار مویرگی در انتقال انرژی سطحی که با فشارهای دینامیکی موجود، قطرات را تولید می‌کند و در نتیجه، مقدار پارامتر بازده از رابطه زیر به دست می‌آید [۴۸]:

$$\zeta_a = 2\sigma_L \left(\frac{3}{d_{32}} - \frac{2}{d_j} \right) \left[\frac{8\dot{m}_L}{\pi^2} \left(\frac{1}{\rho_L d_j^4} + \frac{ALR^2}{\rho_G d_j^4} \right) \right]^{-1} \quad (۴-۸)$$

رابطه اتمیزاسیون شامل پارامترهایی برای تولید قطرات از کوچک‌ترین اندازه d_{32} ، شدت جریان آب

$\dot{m}_L$ ، قطر انژکتور آب d_j ، قطر انژکتور هوا d_G ، نسبت شدت جریان هوا به آب ALR ، چگالی آب ρ_L

چگالی هوا ρ_G و کشش سطحی بین هوا و آب σ_L است.

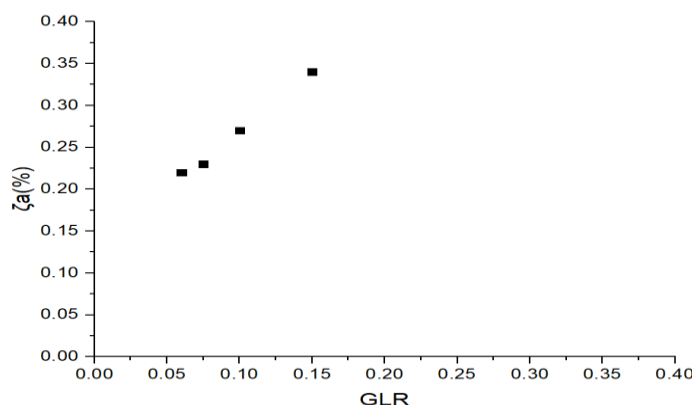
شکل ۴-۵۶ نتایج به دست آمده برای بازده اتمیزاسیون جت‌های برخوردی به کمک هوا به عنوان تابعی

از GLR را نشان می‌دهد. با بالا رفتن مقدار GLR منجر به کوچک تر شدن اندازه قطرات می‌شود که

نشان‌دهنده افزایش بازده انژکتور است. برای توضیح تفاوت بین بازده اتمیزه شدن (ζ_a) با رابطه ارائه شده

توسط بازده اتمیزه شدن (η_a) می‌توان به مقدار حداقلی مقدار d_{32} اشاره کرد که بازده انژکتور را بالاتر

می‌برد.



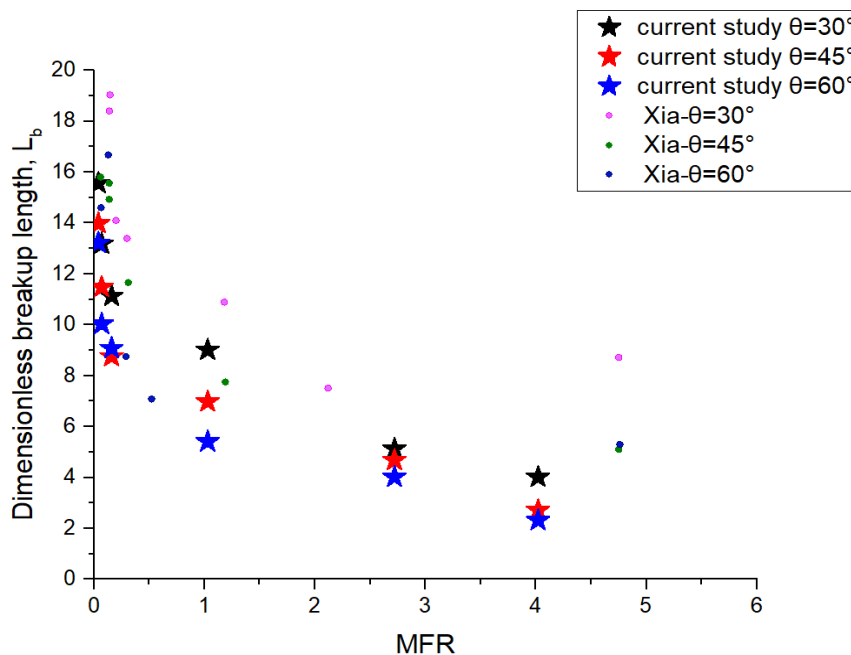
شکل ۴-۵۶- بازده اتمیزاسیون جت‌های برخوردی به کمک هوا به عنوان تابعی از GLR

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

در این فصل به جمع‌بندی مطالب گفته شده می‌پردازیم. هم‌چنین با توجه به مقالات ارائه شده در مورد موضوع مورد بحث پیشنهادهایی برای ادامه‌ی مطالعه و تحقیق در این زمینه مطرح خواهد شد. مقایسه برخی از نتایج تجربی به‌دست آمده توسط سایر پژوهشگران در این فصل آمده است.

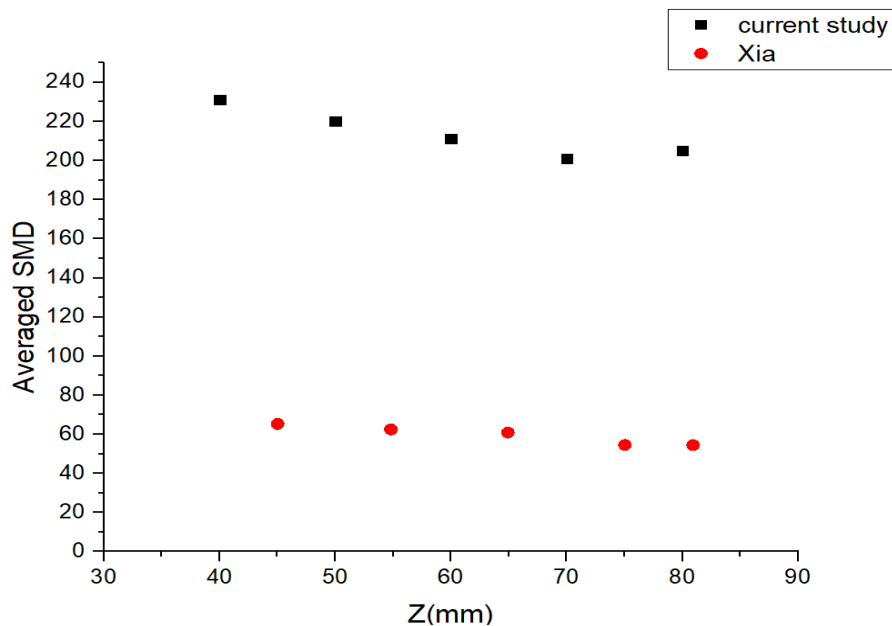
۵-۱- مقایسه نتایج

شکل ۵-۱ طول فروپاشی بدون بعد را برای حالت‌های برخورد جت با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به عنوان تابعی از MFR، همان‌طور که در معادله (۴-۴) تعریف شده است، نشان می‌دهد. مقایسه نتایج تجربی فعلی با نتایج به‌دست آمده توسط آقای ژیا در سال ۲۰۱۸ [۵۱] انجام شده است. نتایج طول فروپاشی در کار حاضر بر تقسیم بر عدد ۱ میلی‌متر که قطر انژکتور آب می‌باشد، بدون بعد شده است. نتایج طول فروپاشی در کار آقای ژیا [۵۱] بر تقسیم بر عدد ۰/۶۸ میلی‌متر که قطر انژکتور آب می‌باشد، بدون بعد شده است. بیش‌ترین عدد طول فروپاشی در کار حاضر عدد ۱۵/۳۶ در زاویه برخورد ۳۰ درجه در $MFR=0/04$ و بیش‌ترین عدد طول فروپاشی در کار ژیا [۵۱] عدد ۱۹/۱۳ در زاویه برخورد ۳۰ درجه در $MFR=0/14$ است. بیش‌ترین اندازه طول فروپاشی در هر دو کار مقایسه شده در $MFR < 1$ می‌باشد. در هر دو بررسی انجام شده، طول فروپاشی از $MFR > 1$ به سرعت کاهش پیدا می‌کند و به مقدار ثابت می‌رسند. در نقطه برخورد دو جت، اگر فشار کل هوا از فشار آب بزرگ‌تر باشد، جت هوا قادر به نفوذ در جت آب است. در نتیجه، با افزایش فشار هوا طول فروپاشی جت آب کوچک‌تر می‌شود. اعداد MFR به‌دست آمده در مقایسه دو نتایج با یکدیگر به‌دلیل متفاوت بودن شدت جریان‌های مختلف فرق می‌کند. طول فروپاشی به‌دست آمده در کار حاضر به‌علت بیش‌تر بودن شدت جریان جرمی هوا نسبت کار آقای ژیا [۵۱] کوچک‌تر است. یک زاویه برخورد بزرگ‌تر منجر به طول فروپاشی کوتاه‌تر می‌شود.



شکل ۵-۱- مقایسه طول فروپاشی بدون به دست آمده در مقایسه با کار آقای ژیا [۵۱]

مقادیر قطر متوسط ساوتر اندازه گیری شده در امتداد محور Z ($X=0$ میلی متر) در پاشش تحت شرایط شدت جریان حجمی ۱۰۰ میلی لیتر بر دقیقه، شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه و زاویه ۴۵ درجه در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. مقدار قطر متوسط ساوتر در کار حاضر در موقعیت مکانی $X=0$ میلی متر در مکان های محوری مختلف ۲۳۱ میکرون در فاصله محوری ۴۰ میلی متر از نقطه برخورد به مقدار ۲۰۵ میکرون در فاصله محوری ۸۰ میلی متر کاهش پیدا می کند. مقدار قطر متوسط ساوتر در کار ژیا [۵۱] در موقعیت مکانی $X=0$ میلی متر در کار حاضر در مکان های محوری مختلف ۶۵ میکرون در فاصله محوری ۴۰ میلی متر از نقطه برخورد به مقدار ۵۵ میکرون در فاصله محوری ۸۰ میلی متر کاهش پیدا می کند. دلیل اول کاهش مقدار قطر متوسط، اتمیزاسیون ثانویه است. دلیل دوم پراکندگی است که در آن رفتارهای پاشندگی اندازه های مختلف قطرات در محل تشکیل قطرات، به عنوان مثال قطرات بزرگ تر واقع در لبه های پاشش مایل به سمت پایین حرکت کرده و ممکن است در ناحیه مرکزی سطح مقطع پایین تر جابجا شوند.



شکل ۵-۲- مقایسه قطر متوسط ساوتر به دست آمده در مقایسه با کار آقای ژیا در شدت جریان ۱۰۰ میلی لیتر بر دقیقه و شدت جریان جرمی ۱۵ گرم بر دقیقه در $X=0$ میلی متر [۵۱]

۵-۲- نتیجه گیری

مشخصات پاشش یک انژکتور جت آب برخوردی به کمک هوا در شرایط مختلف با استفاده از آب به عنوان سیال مایع و هوا به عنوان گاز اتمیزکننده، مورد مطالعه قرار گرفته است. با تغییر پارامترهایی همچون جت آب و هوای برخوردی، اثر این پارامترها بر نتایج نهایی بحث شد. این اثر در قالب اعداد بدون بُعد شده و بر گاز، رینولدز آب، نسبت تکانه هوا به آب، نسبت تکانه هوا به آب و نسبت شدت جریان هوا به آب بیان شد. مشاهده شد که هر دو طول فروپاشی جت آب و اندازه قطرات حاصل با افزایش سرعت جریان هوا کاهش می یابد. همان طور که مشاهده شد با افزایش مقدار پارامتر MFR طول فروپاشی بدون بعد از مقدار ۱۵/۵۶ به مقدار ۲/۰۴ می رسد و یک زاویه برخورد بزرگتر منجر به طول فروپاشی کوتاه تر می شود.

از تجسم پاشش، رژیم های فروپاشی شبیه به رژیم های مشاهده شده در انژکتورهای هوا-محور طبق نمودار آقای هافینگر [۲۸] شناسایی شدند. به طور کلی، مشاهده می شود که با تغییر نسبت هوا به آب، امکان به دست آوردن یک اتمیزاسیون ریز پاشش با استفاده از پیکربندی جت برخوردی به کمک هوا وجود

دارد. اندازه‌گیری‌های اندازه قطرات در فاصله ۸۰ میلی‌متر در پایین‌دست نقطه برخورد کاهش اندازه قطرات را با حضور جت‌هوا نشان داد، در حالی که افزایش سرعت جت‌آب باعث افزایش اندازه قطرات شد. تغییرات در اندازه قطرات با فاصله شعاعی مشاهده شد و این تغییر با افزایش سرعت جت‌آب افزایش یافت. به طور کلی، نتایج تجربی نشان می‌دهد که شار تکانه جت‌هوا به آب نقش پررنگی در فروپاشی جت‌آب ایفا می‌کند. افزایش شار تکانه جت‌هوا به آب یا با افزایش نرخ جریان هوا منجر به فروپاشی بهبود یافته می‌شود. با تغییر پارامترهایی هم چون سرعت جت آب و هوای برخوردی، اثر این پارامترها بر نتایج نهایی بحث شد. این اثر در قالب اعداد بدون بعد وبر گازی و نسبت تکانه هوا به هوا بیان شد. نتایج به‌دست آمده به این شرح می‌باشد :

❖ در این پژوهش عدد وبر بین ۲۱-۶۳۹ و عدد رینولدز بین ۱۳۲۱-۶۶۰۵ است. در این پژوهش دو نوع فروپاشی بررسی شده برای جت آب از نوع فروپاشی مدل کیسه‌ای برای اعداد وبر بین ۲۰ و ۸۰ و فروپاشی مدل فیبر برای اعداد وبر بالای ۸۰ هست. فروپاشی با عدد وبر (سرعت جت هوا) رابطه مستقیم دارد.

❖ برای مقادیر نسبت شار تکانه هوا به آب کمتر از یک، طول فروپاشی بدون بعد از مقدار حداکثر خود یعنی عدد ۱۶ به مقدار زیادی کاهش پیدا می‌کند و سپس به مقدار ثابتی برای نسبت شار تکانه هوا به آب بزرگ‌تر از یک میل می‌کند. بیش‌ترین طول فروپاشی بدون بعد برای زاویه ۳۰ درجه می‌باشد.

❖ زوایای واگرایی پاشش و هم زوایای انحراف با نرخ جریان جرمی هوا در نرخ جریان آب ثابت افزایش می‌یابد؛ اما اثرات نرخ جریان آب در نرخ‌های جریان جرمی هوا ۵ گرم بر دقیقه، درخور توجه نیست.

❖ قطر متوسط ساوتر (SMD) یا نسبت حجم متوسط به سطح متوسط قطرات مورد پاشش بوده و در سیستم‌های احتراقی به منظور ارزیابی کیفیت اتمیزاسیون به کار می‌رود. این پارامتر به نوعی نشان‌دهنده میزان ریزی قطرات حاصل از پاشش بر مبنای سطح تولیدشده توسط پاشش است.

❖ در نواحی مرکزی پاشش یا نزدیک به $X = 0$ میلی‌متر، اندازه قطرات کمتر از سایر مکان‌های محوری است؛ با توجه به مشخص بودن تعداد و هم‌چنین با داشتن اندازه قطر قطرات می‌توان قطر متوسط ساوتر را حساب کرد. قطرات بزرگ‌تر به طرف کناره‌های پاشش متمایل هستند. یکی از دلایل کوچک‌تر بودن قطر قطرات در مرکز پاشش به دلیل تأثیر زیاد جت هوا در

- ❖ پایین دست نقطه برخورد است. قویترین برهم کنش بین دو جت در ناحیه مرکزی پاشش است.
- ❖ اندازه قطرات تحت تأثیر عدد وبر و نسبت تکانه، تغییر می کنند.
- ❖ در پایین دست ناحیه برخورد، صفحه آب و لیگامنت ها توسط نیروهای تکانه هوا تحریک می شوند و در نتیجه، سرعت به حداکثر مقدار $37/5$ متر بر ثانیه در فاصله 50 میلی متری نقطه برخورد دو جت می رسد.
- ❖ هر چه از نقطه برخورد دو جت دورتر شویم، در پاشش تولید شده توسط دو جت، سرعت قطرات در راستای محور Z افزایش و سپس به دلیل اینکه قطرات کوچک تر به قطرات بزرگ تر تبدیل می شوند و همچنین تأثیر تکانه هوا کم می شود، سرعت قطرات به تدریج کاهش پیدا می کند.
- ❖ افزایش پارامتر GLR ، منجر به کوچک تر شدن اندازه قطرات می شود و این امر نشان دهنده، افزایش عملکرد انژکتور است.
- ❖ بیشترین بازده موجود مربوط به عدد $0/89$ درصد در قطر حدود 190 میکرون است.

۵-۳- پیشنهاد ادامه انجام کار

برای ادامه ی تحقیقات در زمینه الگوی پاشش در اثر برخورد دو جت هوا و آب می توان موارد زیر را مورد، بررسی قرار داد:

- (۱) بررسی اثر تفاوت قطر دو انژکتور جت سیال هوا و آب در الگوی پاشش.
- (۲) بررسی اثر کشش سطحی و لزجت روی الگوی پاشش.
- (۳) استفاده از سه جت مختلف و بالاتر برای مطالعه الگو و رفتار پاشش.
- (۴) اثر پارامتر کم وزیاد کردن فاصله نقطه ی برخورد دو جت.
- (۵) استفاده از سیال های دیگر بجای سیال آب، از اتانول و به جای سیال هوا، از گاز نیتروژن استفاده شود.

- [1] Y. S. Shim, G. M. Choi, and D. J. Kim, "Numerical and experimental study on hollow-cone fuel spray of highpressure swirl injector under high ambient pressure condition," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 2, pp. 320–329, Feb. 2008, doi: 10.1007/s12206-007-1044-3.
- [2] S. Padala, S. Kook, and E. R. Hawkes, "Effect of ethanol port-fuel-injector position on dual-fuel combustion in an automotive-size diesel engine," in *Energy and Fuels*, Jan. 2014, vol. 28, no. 1, pp. 340–348, doi: 10.1021/ef401479s.
- [3] Ballester, J. and Dopazo, C. "Drop Size Measurements in Heavy Oil Sprays from Pressure-swirl Nozzles", *Atomization and Sprays*, Vol. 6, No. 4, pp. 377-408, 1996.
- [4] Lefebvre, A. H., *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, NY, USA (1989).
- [5] Lefebvre, A.H., 2000. Fifty years of gas turbine fuel injection. *Atomization Sprays* 10, 251–276.
- [6] Mikaniki, P., Najafi, S. M. A., & Ghassemi, H. Experimental study on macroscopic structure of heavy fuel oil spray in thermal power plants (pressure-swirl injector). ۴th conference on thermal power plants (gas, combined cycle, steam), Tehran, Iran, ۲۰۱۵ (in persian).
- [7] Trinh, H.P. "Modeling of Turbulent Effect on Liquid Jet Atomization", Alabama, Marshal Space Flight Center, 2007
- [8] X. Jiang, G. A. Siamas, K. Jagus, and T. G. 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, no. 2, pp. 131–167, 2010, doi: 10.1016/j.pecs.2009.09.002.
- [9] Liquid rocket engine injectors-1976.
- [10] X. CHEN and V. YANG, "Recent advances in physical understanding and quantitative prediction of impinging-jet dynamics and atomization," *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 32, no. 1, pp. 45–57, 2019, doi: 10.1016/j.cja.2018.10.010.

- [11] Anderson, W. E., Ryan, H. M., Pal, S., and Santoro, R. J, “Fundamental studies of impinging liquid jets”, *AIAA Materials Specialist Conference-Coating Technology for Aerospace Systems*, volume 1, 1992.
- [12] Mehegan, P. F., Campbell, D. T, and Schenerman, C. H., “Investigation of gas-augmented injectors”, NASA CR-72703, September 1970.
- [13] Farvardin, Ehsan. Biodiesel Spray Characterization: A Combined Numerical and Experimental Analysis. Ph. D. thesis, Concordia University, 2013.
- [14] S. S. Lee, W. H. Kim, and W. S. Yoon, “Spray formation by like-doublet impinging jets in low speed cross-flows,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 6, pp. 1680–1692, 2009, doi: 10.1007/s12206-009-0419-z.
- [15] M. Behzad, N. Ashgriz, and B. W. Karney, “Surface breakup of a non-turbulent liquid jet injected into a high pressure gaseous crossflow,” *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 80, pp. 100–117, 2016, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.11.007.
- [16] Lefebvre, A.H. and Ballal, D.R. *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*, Third Edition. CRC Press, 2010.
- [17] Li, Xiaoyi and Soteriou, Marios C. High fidelity simulation and analysis of liquid jet Atomization in a gaseous crossflow at intermediate weber numbers. *Physics of Fluids*, 28(8): 082101, 2016.
- [18] Ashgriz, N. *Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications*. Link: bucher. Springer Us, 2011.
- [19] E. Ibrahim, and A. Przekwas, “Impinging jets atomization,” *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, vol. 3, no. 12, pp. 2981-2987, 1991.
- [20] G. Baek, S. Kim, J. Han, and C. Kim, “Atomization characteristics of impinging jets of gel material containing nanoparticles,” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 166, no. 21–22, pp. 1272–1285, 2011, doi: 10.1016/j.jnnfm.2011.08.005.
- [21] X. Chen, D. Ma, V. Yang, and S. Popinet, “High-fidelity simulations of impinging jet atomization,” *At. Sprays*, vol. 23, no. 12, pp. 1079–1101, 2013, doi: 10.1615/AtomizSpr.2013007619.

- [22] P. C. Hooper, "A study of the sprays formed by impinging jets low in laminar and turbulent f." 1963.
- [23] W. -H. Lai, W. Huang, and T. -L. Jiang, "Characteristic study on the like-doublet impinging jets atomization," *Atomization and Sprays*, vol. 9, no. 3, 1999.
- [24] Y. Xia, L. Khezzar, S. Bojanampati, and A. Molki, "Breakup of the Water Sheet Formed by Two Liquid Impinging Jets," *International Journal of Chemical Engineering*, vol. 2019. 2019, doi: 10.1155/2019/9514848.
- [25] Mayer, W. O. H. "Coaxial Atomization of a Round Liquid Jet in a High Speed Gas Stream a Phenomenological Study", *Experiments in Fluids*, Vol. 16, No. 6, pp. 401-410, 1994.
- [26] C. Engelbert, Y. Hardalupas, and J. H. Whitelaw, "Breakup phenomena in coaxial airblast atomizers," *Proc. R. Soc. London. Ser. A Math. Phys. Sci.*, vol. 451, no. 1941, pp. 189–229, 1995.
- [27] J. C. Lasheras, S. Diego, E. Villermaux, and E. J. Hopfinger, "Break-up and atomization of a round water jet by a high-speed annular air jet," no. February, 1998, doi: 10.1017/S0022112097008070.
- [28] J. C. Lasheras and E. J. Hopfinger, "LIQUID JET INSTABILITY AND ATOMIZATION IN A COAXIAL GAS STREAM," no. 1873, pp. 275–308, 2000.
- [29] C. M. Varga, J. C. Lasheras, and E. J. Hopfinger, "Initial breakup of a small-diameter liquid jet by a high-speed gas stream," *Journal of Fluid Mechanics*, no. 497, pp. 405–434, 2003, doi: 10.1017/S0022112003006724.
- [30] A. Kourmatzis and A. R. Masri, "Air-assisted atomization of liquid jets in varying levels of turbulence," *J. Fluid Mech.*, vol. 764, pp. 95–132, 2014, doi: 10.1017/jfm.2014.700.
- [31] M. Roudini and G. Wozniak, "Experimental Investigation of Spray Characteristics of Pre-filming Air-blast Experimental Investigation of Spray Characteristics of," no. October, 2018, doi: 10.29252/acadpub.jafm.73.249.28115.

- [32] H. F. Liu et al., "Effect of liquid jet diameter on performance of coaxial two-fluid airblast atomizers," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 45, no. 4, pp. 240–245, 2006, doi: 10.1016/j.cep.2005.08.003.
- [33] A. Sinha, R. Surya Prakash, A. Madan Mohan, and R. V. Ravikrishna, "Airblast spray in crossflow - structure, trajectory and droplet sizing," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 72, pp. 97–111, 2015, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.02.008.
- [34] R. Ma, B. Dong, Z. Yu, T. Zhang, Y. Wang, and W. Li, "An experimental study on the spray characteristics of the air-blast atomizer," *Applied Thermal Engineering*, vol. 88, pp. 149–156, 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.11.068.
- [35] G. M. Faeth, L. P. Hsiang, and P. K. Wu, "Structure and breakup properties of sprays," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 21, pp. 99–127, 1995, doi: 10.1016/0301-9322(95)00059-7.
- [36] A. M. Hasan and M. A. Mashkour, "Droplet size measuring (SMD) of biodiesel and its blends using dispersion technique , by high shutter speed camera equipped with high speed flash light and using (Mtlab) image proc ... Droplet size measurement of biodiesel and its blends using disper," *Journal of Engineering and Sustainable Development*, no. August. 2018.
- [37] J. M. Legg, A. A. Narvaez, and V. G. McDonell, "Performance of Algae-derived renewable diesel in a twin-fluid airblast atomizer," *ICLASS 2012 - 12th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*. 2012.
- [38] 12. G. E. Lorenzetto and A. H. Lefebvre, (1977). "Measurements of drop size on a plain jet airblast atomization". *AIAA J.*, vol. 15, pp. 1006-1010.
- [39] C. Pereira, G. Wang, and M. Costa, "Combustion of biodiesel in a large-scale laboratory furnace," *Energy*, vol. 74, no. C, pp. 950–955, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.07.077.
- [40] E. J. Hopfinger, "Liquid jet instability and atomization in a coaxial gas stream," *Fluid Mech. its Appl.*, vol. 46, pp. 69–78, 1998, doi: 10.1007/978-94-011-5118-4_17.
- [41] P. B. Kowalczyk and J. Drzymala, "Physical meaning of the Sauter mean diameter of spherical particulate matter," *Particulate Science and Technology*, vol. 34, no. 6, pp. 645–647, 2016, doi: 10.1080/02726351.2015.1099582.

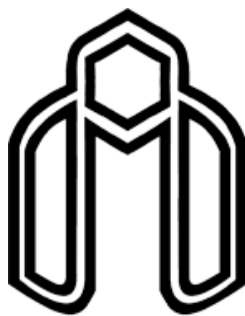
- [42] Sauter, J. 1926. Die Grössenbestimmung der in Gemischnebeln von Verbrennungskraftmaschinen vorhandenen Brennstoffteilchen. German: VDI-Verlag G. M. B.
- [43] Pacek, A. W., C. C. Man, and A. W. Nienow. 1998. On the Sauter mean diameter and size distributions in turbulent liquid/liquid dispersions in a stirred vessel. *Chemical Engineering Science* 53 (11):2005–11. doi:10.1016/s0009-2509(98)00068-2
- [44] M. M. Avulapati and R. Rayavarapu Venkata, “Experimental studies on air-assisted impinging jet atomization,” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 57, pp. 88–101, 2013, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.07.007.
- [45] C. Inoue, T. Watanabe, T. Himeno, and S. Uzawa, “Impinging atomization enhanced by microjet injection - effect, mechanism and optimization,” in 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2013, vol. 1 PartF, p. 3705, doi: 10.2514/6.2013-3705.
- [46] M. M. Avulapati and R. V. Ravikrishna, “Experimental studies on air-assisted atomization of *Jatropha* pure plant oil,” *At. Sprays*, vol. 25, no. 7, pp. 553–569, 2015, doi: 10.1615/AtomizSpr.2014010413.
- [47] Y. Xia, L. Khezzar, M. Alshehhi, and Y. Hardalupas, “Droplet size and velocity characteristics of water-air impinging jet atomizer,” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 94, pp. 31–43, 2017, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.04.014.
- [48] B. Pizziol, M. Costa, M. O. Panão, and A. Silva, “Multiple impinging jet air-assisted atomization,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 96, no. March, pp. 303–310, 2018, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2018.03.019.
- [49] Y. Xia, L. Khezzar, M. Alshehhi, and Y. Hardalupas, “Atomization of impinging opposed water jets interacting with an air jet,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 93, no. May 2017, pp. 11–22, 2018, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.12.010.
- [50] N. A. Committee and F. O. R. Aeronautics, “Drops Size Distributions for Impinging Jet Breakup In Airstreams Simulating the Velocity Conditions in Rocket Combustion,” 1958.
- [51] Y. Xia, M. Alshehhi, Y. Hardalupas, and L. Khezzar, “Spray characteristics of free air-on-water impinging jets,” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 100, pp. 86–103, 2018, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.12.007.

Abstract

Liquid fuel injection into air-jet flow provides high fluid penetration, rapid air mixture, and performance enhancement. It has numerous applications in airbreathing propulsion systems (including gas turbine, internal combustion engine, and ramjet), liquid rocket engine, and fuel injection. In this research performed in the laboratory, the water-jet breakup patterns are studied by the impinging of water and air jets in different flows. In the subsequent research, the average sizes of the droplets in axial and radial distances are acquired using image processing in LabView software. Particular image processing is implemented to calculate the speed of a droplet, which could be applied to calculate the velocity of the droplet in different axial distances under the impinging point. The effects of some parameters such as impinging angle and water and air flows are evaluated in water-jet formation. The primary parameters effective on the injection structure are recognized.

A parametric study is performed on air-water momentum ratio, air-water momentum flux ratio, and air-water flow ratio. This investigation is conducted after recognition of the mentioned parameters that are highly influential on injection properties. In general, the experimental results revealed that the momentum flux of the air-jet compared with the water-jet has a more prominent role in the water-jet breakup. Increasing air-jet momentum flux in water or increasing airflow rate culminate in an improved breakup. In this research, the water-jet plate with membrane breakup and fiber breakup models underwent breakup in low and high velocities, respectively. In addition, it is observed that by increasing the speed of air at the impinging point, the instabilities on the water jet are intensified. Parameters such as air-water momentum ratio, air-water momentum flux ratio, air-water flow ratio, and impinging angle are studied to describe the average value of sauter mean diameter of injection. The efficiency of impinging jet injectors is analyzed for water in several air-water flow ratios with the help of air. Two different injection angles are defined in this study to describe the injection structure, including the deviation (β) and divergence (α) angles. Furthermore, the volumetric water flux density is investigated in different time pulses.

Keywords: Impinging jet, Liquid breakup length, SMD, Atomization efficiency



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M. Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

**Experimental study of spray behavior
under the influence of impinging jets**

By: **Ali harati**

Supervisor:

Dr. Ali Sarreshtedari

Advisor:

Dr. Mohsen Nazari

September 2021