



Experimental Study of Liquid Sheet Breakup in Cross Flow

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Olyaei Gh.¹ MSc,
Kebriaee A.*¹ PhD

How to cite this article

Olyaei Gh, Kebriaee A. Experimental Study of Liquid Sheet Breakup in Cross Flow. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(4):845-853.

ABSTRACT

The present study was performed to experimentally investigate the regime of the liquid sheet breakup and the effects of dimensionless numbers on the penetration and trajectory of the liquid sheet in cross flow condition. The shadowgraphy technique was applied to study the tests. In this work, the effect of the non-dimensional numbers (momentum ratio and Weber number) were surveyed on the breakup of the liquid sheet. Also, some equations for the injection trajectory, the length, and the height of the jet were presented based on these non-dimensional numbers. The tests were done at atmospheric pressure and temperature, where the Weber number range is from 0.8 to 12.5, the variations of the momentum ratio are from 17.4 to 250, and the changes in the Reynolds number are from 2400 to 10227. Three regimes of jet breakup were observed, defined as column breakup, column-bag breakup, and bag breakup. The Weber number is the most effective parameter in the regime change of the liquid sheet breakup. The results also indicated that the increase in the momentum ratio has a great influence on the depth of penetration of the liquid sheet, but it has a very small effect on the breakup regimes.

Keywords Liquid Sheet; Primary Atomization; Gas Weber Number; Momentum Ratio

¹Aerospace Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Sharif University of Technology, Azadi Street, Tehran, Iran,
Postal code: 1458889694
Phone: +98 (21) 66164600
Fax: +98 (21) 66022731
kebriaee@sharif.ir

Article History

Received: May 02, 2018
Accepted: November 02, 2018
ePublished: April 06, 2019

CITATION LINKS

[1] Morphological classification of low viscosity drop bag breakup in a continuous air jet stream [2] Vortical structure in the wake of a transverse jet [3] Transient behavior of liquid jets injected normal to a high-velocity gas stream [4] Characterization of the initial spray from low-Weber-number jets in crossflow [5] An experimental study of the effect of gas density on the distortion and breakup mechanism of drops in high speed gas stream [6] Fundamental classification of atomization processes [7] Instability and breakup of a gas-cored viscous annular jet [8] Breakup processes of liquid jets in subsonic crossflows. 32nd Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1-3 July, 1996, Lake Buena Vista, Florida, USA [9] Primary break-up of a viscous liquid jet in a cross airflow [10] Properties of nonturbulent round liquid jets in uniform crossflows [11] Effects of turbulence on the breakup of round liquid jets in gaseous crossflow [12] Trajectory of water jet exposed to low subsonic crossflow [13] Liquid jet breakup studies in subsonic air stream at elevated temperatures [14] Effect of orifice configuration on the penetration height in crossflow [15] Liquid jets in crossflow at elevated temperatures and pressures [16] An experimental study of liquid jet into a crossflow, based on schlieren technique [17] Experimental study of effective factors on liquid jet trajectory and breakup in gaseous crossflow [18] Design and manufacture of powerful diode stroboscopes for staging fast phenomena [19] Enlighten brighter than light

مطالعه تجربی واپاشی صفحه مایع در حضور جریان عرضی

قادر علیایی MSc

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

آزاده کبریایی* PhD

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده

مطالعه روی تولید اسپری در حضور جریان عرضی به علت مزایای زیاد آن توسط محققان زیادی مورد توجه قرار گرفته است که با توجه به هندسه انژکتور استفاده شده، سیال خروجی از آن می‌تواند به صورت جت یا صفحه مایع باشد. تحقیق پیش رو به منظور بررسی تجربی نحوه شکست صفحه مایع و تاثیر اعداد بی‌بعد در نفوذ و مسیر آن در جریان پاشش متقاطع انجام شده است. برای مطالعه پارامترهای مورد نظر از روش سایه‌نگاری استفاده شده است. در این کار تاثیر اعداد بی‌بعد (نسبت مومنتوم و وبر) در نحوه شکست صفحه مایع مورد بررسی قرار گرفته است و همچنین براساس اعداد بی‌بعد برای مسیر پاشش، طول و ارتفاع صفحه ستون مایع معادلاتی ارایه شده است. آزمایش‌ها در فشار و دمای محیط صورت گرفته است و عدد وبر گاز از ۰/۸ تا ۱۲/۵، نسبت شار مومنتوم از ۱۷/۴ تا ۲۵۰ و عدد رینولدز هوا از ۲۴۰۰ تا ۱۰۲۲۷ تغییر می‌کند. در محدوده وبر گازی ارایه شده سه نوع شکست ستونی، شکست ستونی کیسه‌ای و شکست کیسه‌ای اتفاق می‌افتد که عدد وبر تاثیرگذارترین پارامتر در تعیین رژیم‌های شکست است. همچنین یافته‌ها بیانگر آن هستند که افزایش نسبت مومنتوم تاثیر زیادی در عمق نفوذ صفحه مایع داخل جریان عرضی داشته ولی تاثیر خیلی کمی در رژیم‌های شکست دارد.

کلیدواژه‌ها: صفحه مایع، اتمیزاسیون اولیه، مسیر جت، عدد وبر گازی، نسبت مومنتوم

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۱

*نویسنده مسئول: kebriaae@sharif.ir

۱- مقدمه

اسپری‌ها به‌طور گسترده‌ای در کاربردهای مختلف صنعتی از قبیل پوشش، خنک‌کاری، موتورهای احتراقی و صنایع داروسازی استفاده می‌شوند. میان انواع انژکتور برای تولید اسپری، انژکتورهای ساده اریفیسبی به‌دلیل سادگی و سهولت ساخت به‌طور وسیع در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ورودی‌ها (نازل) بسته به هندسه‌های داخلی خود، قابلیت ایجاد اشکال مختلف جت را دارند که معمول‌ترین نوع آنها جت دایره‌ای است. کنار انژکتورهای اریفیسبی با جت خروجی دایروی می‌توان به انژکتورهای فشاری- چرخشی و اسلینگر نیز اشاره کرد که شکل مایع خارج شده از آنها به‌صورت صفحه است. مکانیزم شکست صفحه مایع کاملاً از واپاشی جت‌های دایروی متفاوت است. علاوه بر این، وجود جریان عرضی در انژکتور اسلینگر، مشخصات شکست جت را متفاوت می‌سازد.

مطالعه روی اسپری در حضور جریان‌های متقاطع طی چندین سال اخیر مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. از کاربرد این جریان‌ها در هوافضا می‌توان به خنک‌کاری پره‌های توربین^[1]، روغن‌کاری محفظه بیرینگ^[2]، تنظیم بردار تراست، تزریق سوخت در پس‌سوز موتور^[3]، تزریق سوخت در توربین‌گازها^[4] و رم جت‌ها و اسکریم جت‌ها^[5] در جریان عرضی مادون صوت و مافوق صوت نام برد. تمرکز بر مطالعه جت مایع تزریقی در جریان عرضی وابسته به کاربرد آن متفاوت است. به‌عنوان مثال، در خنک‌کاری در نزدیکی دیواره‌های داغ، از اتمیزاسیون مایع به‌عنوان لایه‌ای برای جلوگیری از آسیب به سازه استفاده می‌شود، در حالی که در زمان احتراق با

ماکزیمم‌کردن میزان اختلاط سوخت اسپری شده و اکسایزر به‌دنبال یک اشتعال ایده‌آل هستیم.

به‌طور کلی، جت‌های شیباری (صفحه‌ای) با توجه به ناپایداری ذاتی خود، نیاز به انرژی کمتری برای فروپاشی دارند. علاوه بر این، سطح جانبی جت شیباری بزرگ‌تر از یک جت دایروی با همان قطر معادل است و از این رو، تفاوت بیشتر در نسبت ابعاد روزنه باعث بی‌ثباتی بیشتر جت مایع شیباری می‌شود و تجزیه سریع‌تری را به ارمغان می‌آورد. بهره‌مندی از چنین نازلی باعث کاهش طول فروپاشی (به‌علت حذف یک مرحله نسبت به جت شیباری)، مخلوط‌شدن سریع‌تر سوخت با هوا، اتمیزاسیون بسیار سریع و کنترل محل سوخت می‌شود.

اتمیزرها را می‌توان براساس هندسه خروجی مایع، شکل‌گیری قطرات و فیزیک شکست به پنج گروه جت، صفحه، فیلم، پرامپت و پارسل مجزا دسته‌بندی کرد که در شکل ۱ قابل مشاهده است^[6]. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، جت و صفحه مایع از نظر ظاهری تفاوت زیادی دارند، بنابراین شکست آنها در روش‌های مختلف متفاوت خواهد بود. البته در رژیم‌های خاصی، مشابهت‌هایی با هم دارند و مهم‌ترین عامل اختلاف در شکست این دو هندسه، مقدار کشش سطحی است^[7]. برای فهم فرآیند اتمیزاسیون جت در جریان عرضی و درک فیزیک آن، کارهای تجربی، عددی و تحلیلی زیادی در این زمینه صورت گرفته است. کارهای انجام‌شده روی جت را می‌توان براساس مهم‌ترین پارامترهایی که در جریان‌های متقاطع مورد توجه محققان قرار گرفته است، به‌صورت انواع شکست ستون جت، مسیر حرکت یا عمق نفوذ جت، قطر قطرات و اسپری شکل‌گرفته بعد از شکست جت دسته‌بندی کرد.

وو و همکاران^[8] در یکی از اولین کارهایی که در زمینه شکست جت انجام شده است، تاثیر سیال‌های متفاوت را در جریان‌های متقاطع دوفازی بررسی کردند. آنها نشان دادند که شکست اولیه جت مایع، برآیند برهم‌کنش پارامترهای آیرودینامیک است. آنها نتیجه گرفتند که در اعداد وبر پایین، ستون مایع، شکست کیسه‌ای را تجربه خواهد کرد و با بالارفتن عدد وبر، نیروهای برشی، نیروی غالب در شکست ستون مایع خواهد بود. آنها مکانیزم شکست در جت‌های مایع تزریق‌شده داخل جریان عرضی مادون صوت را به سه دسته اصلی تقسیم بندی کردند که عبارت از ناحیه ستون جت، ناحیه قطرات بزرگ یا لیگامنت و ناحیه اسپری هستند. نحوه شکست در این نوع جریان‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده است. مطالعه بعدی در این زمینه توسط بیروک و همکاران^[9] صورت گرفت. نتایج آزمایش به‌صورتی بود که نتایج آزمایش وو و همکاران^[8] در مورد شکست کیسه‌ای را نقض می‌کرد. آنها ادعا کردند که شکست کیسه‌ای در اعداد وبر بالاتر اتفاق می‌افتد و در اعداد وبر پایین، شکست ستونی غالب است.

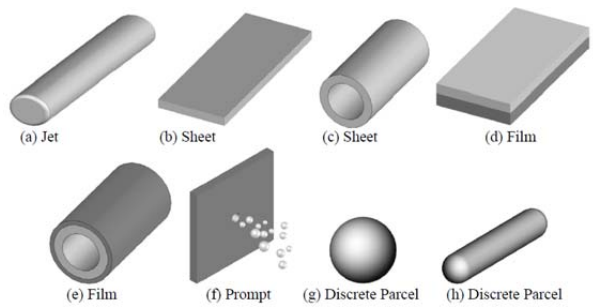
آلبرگ و همکاران^[10] به‌صورت تجربی تاثیر نسبت چگالی را در شکست جت بررسی کردند و نشان دادند که این پارامتر تاثیر چندانی در شکست جت ندارد. آنها همچنین نشان دادند که با افزایش عدد وبر، طول موج و دامنه جت کاهش پیدا می‌کند و با افزایش نسبت مومنتوم، طول موج‌ها افزایش می‌یابد. *سانکارا کریشان* و همکاران^[11] شکست‌ها را براساس عدد وبر به چهار گروه شکست ستونی، شکست کیسه‌ای، شکست ترکیبی و شکست برشی تقسیم‌بندی کردند که یکی از کامل‌ترین تقسیم‌بندی‌ها در این زمینه بوده و شماتیک شکست این دسته‌بندی در شکل ۳ آمده است.

در نفوذ جت در جریان عرضی دارد، یعنی با افزایش دما، نفوذ جت کاهش می‌یابد. نتیجه دیگر کار آنها ارایه رابطه‌ای برای عمق نفوذ جت بود که اثرات دما نیز در آن دیده شده بود. کیم و همکاران [14] اثر مشخصات اریفیس را در تغییر ارتفاع نفوذ جت در جریان عرضی بررسی کردند. آنها در کاری جدید، ارتفاع نفوذ را در شرایط تک اریفیس با دو اریفیس هم‌نوع مقایسه کردند و با بررسی مسیر نفوذ جت نشان دادند که ارتفاع نفوذ جت در حالت دو اریفیس از تک اریفیس بیشتر است. در یکی از کامل‌ترین کارها، عمیقی [15] به روش تجربی، مشخصات جت مایع تزریقی در جریان عرضی مادون صوت را مورد بررسی قرار داد. وی سایز قطرات تولید شده، شکست اولیه جت، موقعیت و زمان شکست اولیه و عرض پلوم را در فشار، دما و سرعت‌های مختلف بررسی کرد. عمیقی در این کار ۲۰۹ نمونه را مورد آزمایش قرار داد و اثرات سرعت‌های مختلف جت و مایع را روی رژیم‌ها و مکانیزم‌های شکست اولیه مورد بررسی قرار داد. همچنین تاثیر پارامترهای بی‌بعد روی زمان و طول شکست اولیه، ناحیه پلوم، زاویه، عرض و ضخامت سطح جت در این کار مورد مطالعه قرار گرفت و روابط تجربی کاملی بر حسب اعداد بی‌بعد برای تزریق جت در جریان عرضی ارایه شد. در زمینه جریان‌های متقاطع چندین کار نیز داخل ایران انجام شده است. اخوین/انصاری و همکاران [16] با استفاده از روش شلرین، تاثیر پارامترهای بی‌بعد در این جریان‌ها را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش عدد وبر، زاویه جت سیال کاهش می‌یابد و تعداد قطرات ریز تولید شده افزایش پیدا خواهد کرد. جلیلی و همکاران [17] تاثیر هندسه نازل را مورد بررسی قرار دادند و در آزمایشات خود از نازل‌های دایروی و بیضوی استفاده کردند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش قطر نازل، عمق نفوذ افزایش می‌یابد.

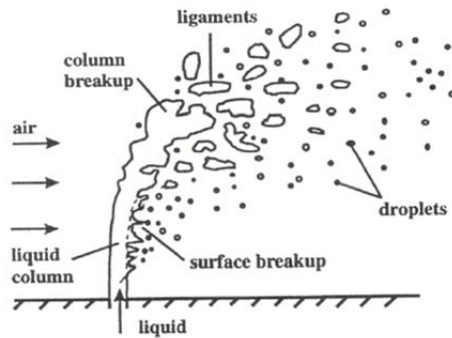
همان طور که در قسمت‌های قبلی اشاره شد، پژوهش‌های متنوعی به‌خصوص به روش تجربی در زمینه نحوه شکست جت مایع در معرض جریان عرضی انجام گرفته است، اما تحقیقات بسیار محدودی، شکست فیلم مایع در جریان عرضی را مورد مطالعه قرار داده‌اند و اطلاعات زیادی از فیزیک چنین جریان‌هایی در دسترس نیست. در کار حاضر با ساده‌سازی مسایل موجود در صنعت و ساخت یک انژکتور با خروجی شیاری با استفاده از روش تجربی به بررسی نحوه شکست و علت تغییر رژیم‌های جریان صفحه مایع در معرض جریان عرضی پرداخته شده است که نتایج این پدیده‌شناسی می‌تواند در کاربردهای صنعتی پیچیده‌تر مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه از ابزار تصویربرداری (سایه‌نگاری) برای شناسایی رفتار صفحه مایع استفاده می‌شود.

۲- تجهیزات آزمایش

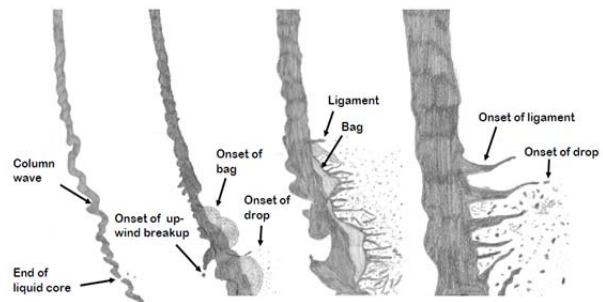
در این تحقیق، آزمایش‌ها داخل تونل باد کوچک مادون صوت انجام شده است. بدنه تونل باد (داکت) از جنس پلکسی با اندازه ۸/۴×۹/۶×۷/۵ سانتی‌متر ساخته شده که یک انژکتور به قطر هیدرولیکی ۰/۶۱ از صفحه زیرین تونل و در ۵۰ سانتی‌متری از ابتدای داکت به داخل آن رزوه شده است. هندسه انژکتور استفاده شده به‌صورت شیاری بوده که طول و عرض آن به ترتیب ۲ و ۰/۳۶ میلی‌متر است. به‌علت تامین دبی ثابت سوخت (آب) و بدون نوسان، سیال از طریق یک مخزن تحت فشار گاز نیتروژن تامین می‌شود. برای ایجاد جریان هوا در داکت از یک بلوتر گریز از مرکز استفاده شده و به‌منظور یکنواخت‌ساختن جریان و کاهش مولفه‌های عمودی سرعت از یک شبکه لانه‌زنبوری به طول ۴ سانتی‌متر که از شش‌ضلعی‌های منتظمی به طول هر ضلع



شکل ۱) انواع مایع خروجی از انژکتورها [6]



شکل ۲) شماتیک شکست جت مایع در جریان عرضی



شکل ۳) انواع شکست جت در جریان متقاطع [11]

وو و همکاران [8] با تحلیل تعادل نیرویی در جهت جریان هوای عرضی بین نیروهای شتاب آیرودینامیک و نیروهای پسای وارد بر ستون جت، مسیر حرکت جت را شبیه‌سازی کردند و ضرایب به‌کاررفته را براساس کارهای تجربی سایه‌نگاری به دست آوردند. آنها براساس تجربیات خود یک مدل پدیده‌شناسی برای نفوذ معرفی کردند که در این زمینه کار آنها به‌عنوان مرجع اصلی برای مطالعات بعدی شد. آنها آزمایش را در شرایط دما و فشار اتاق با نسبت مومنتوم ۴-۱۸۵ و عدد ماخ ۰/۲-۰/۴ انجام دادند و معادلاتی برای تعیین مسیر ستون مایع، ارتفاع شکست ستون مایع و مسافت طولی شکست ستون مایع براساس اعداد بی‌بعد q ، x/d و y/d ارایه کردند.

یوگان و همکاران [12] نشان دادند که در نسبت مومنتوم‌های یکسان، انژکتور با قطر بزرگ‌تر سبب افزایش عمق نفوذ خواهد شد. همچنین آنها نشان دادند که برای انژکتور با قطر ثابت، افزایش نسبت مومنتوم منجر به افزایش عمق نفوذ می‌شود. لاخامر/جو [13] طبیعت شکست جت و نفوذ آن را در جریان عرضی مادون صوت در دماهای بالاتر از دمای اتاق (دمای ۵۰۵-۳۶۳ کلوین و فشار استاندارد) با استفاده از روش سایه‌نگاری مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشاهده کردند که افزایش دما نتیجه‌ای عکس نسبت مومنتوم

۳- شرایط آزمایش

از هوا و آب به ترتیب برای تامین جریان عرضی و جت تزریق شده استفاده شده است. سرعت هوای تامین شده توسط بلوئر از ۲/۴ تا ۳۵/۳ متر بر ثانیه تغییر می‌کند که برای اندازه‌گیری آن از لوله پیتوت استفاده شده است. همچنین سرعت آب از ۲/۷ تا ۱۹/۵ متر بر ثانیه تغییر می‌یابد که توسط شیر سوزنی و فلومتری که در مسیر جریان و قبل از انژکتور بسته شده است، کنترل می‌شود. توربولانس داخل محفظه آزمایش که توسط سیم داغ اندازه‌گیری شده، نزدیک به ۱٪ است که می‌توان نتیجه گرفت، جریان عرضی تقریباً به صورت یکنواخت است. دمای آزمایش و دمای محیط برابر با ۲۵°C بوده و تمامی شرایط آزمایش در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱) شرایط آزمایش‌های انجام شده

مقدار و محدوده	متغیر
۹۹۸	$\rho_l \text{ (kg/m}^3\text{)}$
۱/۲	$\rho_g \text{ (kg/m}^3\text{)}$
۰.۰۷۲۸	$\mu_l \text{ (N.sec/m}^2\text{)}$
۰/۶۱	$d \text{ (mm)}$
۲/۷-۱۹/۵	$V_l \text{ (m/s)}$
۲/۲۲-۳۵/۳	$V_g \text{ (m/s)}$
۰.۰۷۲۸	σ_l
۱۷/۴-۲۵۰	q
۰/۸-۱۲/۵	We_g
۱۳۴-۲۳۶۰	We_l
۳۸۱-۱۴۳۵	Re_g
۲۴۰۰-۱۰۲۲۷	Re_l

۴- نتایج

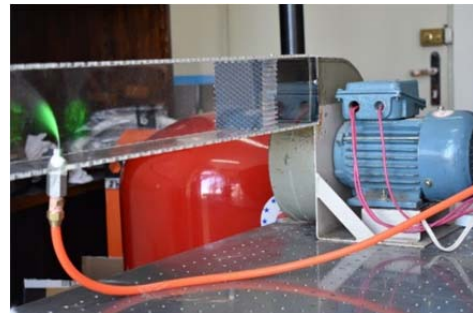
هدف اصلی از انجام این تحقیق، شناسایی پارامترهای تاثیرگذار روی مشخصه‌های اتمیزاسیون اولیه یک جت شیری (صفحه مایع) در حضور جریان عرضی است. به طور کلی مشخصات واپاشی یک جت که شامل مسیر حرکت جت و اندازه قطرات بوده، تابعی از ویژگی‌های فیزیکی دو سیال (آب و هوا) و هندسه انژکتور است.

متغیرهای اثرگذار روی جت را می‌توان به سه دسته پارامترهای فیزیکی مایع شامل چگالی مایع ρ_l ، کشش سطحی مایع σ_l ، ویسکوزیته دینامیک مایع μ_l و سرعت جت مایع U_l ، پارامترهای فیزیکی گاز شامل چگالی مایع ρ_g ، ویسکوزیته دینامیک گاز μ_g و سرعت جت گاز U_g و پارامترهای هندسی جت منفردی که به صورت عمودی به جریان گاز پاشیده می‌شود، تقسیم‌بندی نمود.

از آنجایی که اعداد بی‌بعد از مهم‌ترین پارامترها برای شناسایی انواع رژیم‌های جریان و شکست ستون جت مایع در مسایل جریان متقاطع هستند، در این تحقیق از اعداد بی‌بعد نسبت مومنتوم $q = \rho_l u_l^2 / \rho_g u_g^2$ ، عدد وبر $We_g = \rho_g u_g^2 d / \sigma$ و عدد رینولدز $Re_g = \rho_g u_g d / \mu_g$ برای بررسی رفتار یک جت شیری در حضور جریان عرضی استفاده شده است. در ادامه منظور از عدد وبر، وبر گازی است.

به طور کلی ماهیت اندرکنش جریان‌های جت و صفحه مایع متقاطع با یک جریان گازی به شدت ناپایا است. برای بررسی دقیق‌تر نتایج در ابتدا تصاویر به دست آمده از آزمایش‌ها پردازش شده‌اند. بدین منظور با حذف زمینه عکس‌ها، کیفیت تصاویر بالا می‌رود که این امر دقت اندازه‌گیری نقطه شکست و مکانیزم‌های شکست را افزایش می‌دهد. در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار MATLAB به طور میانگین برای استخراج هر خروجی، از هر ۱۰۰۰

۴ میلی‌متر از جنس آلومینیوم تشکیل شده، استفاده شده است. بلوئر استفاده شده، قابلیت ایجاد جریان هوا تا دبی تقریبی ۰/۳ متر مکعب بر ثانیه را دارد. برای تامین نیروی محرکه بلوئر از یک موتور الکتریکی با توان ۰/۳۷ کیلووات و سرعت دورانی ماکزیمم ۲۸۰۰ دور بر دقیقه استفاده شده است. کنترل دور این موتور توسط یک اینورتر انجام می‌گیرد و فرکانس ورودی به موتور از صفر تا ۶۰ هرتز قابل تغییر است. نمایی از میز آزمون و تجهیزات استفاده شده در شکل ۴ مشاهده می‌شود. لیست تجهیزات استفاده شده در آزمایش به صورت مخزن تحت فشار آب، کپسول نیتروژن، فیلتر آب، دستگاه عکسبرداری، دوربین و لنز، فشارسنج، جک آزمایشگاهی، پمپ آب، لپ‌تاپ، انژکتور، بلوئر، داکت، لانه زنبوری، اینورتر و موتور الکتریکی بود.

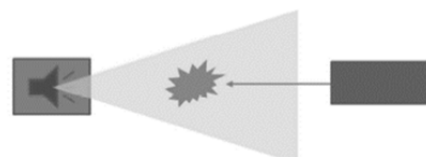


شکل ۴) شماتیک سیستم آزمایشگاهی

۲-۱- سیستم تصویربرداری و آشکارسازی

میان روش‌های مختلف اپتیکی اندازه‌گیری و مطالعه حرکت سیال، سایه‌نگاری یکی از روش‌های مناسب و در عین حال ارزان قیمت است. سایه‌نگاری اغلب در مطالعه کیفی دینامیک سیالات به واسطه آشکارسازی جریان‌ها یا ثبت خطوط جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش با تاباندن نور از پشت در صورت وجود مانع بین منبع نور و صفحه مقصد (دوربین)، سایه مانع روی صفحه نقش می‌بندد. به همین دلیل تصاویر سایه‌نگاری شامل یک زمینه نورانی (ناشی از تاباندن نور) و یک سایه از مانع است [18]. به طور کلی، روش سایه‌نگاری برای محیط شفاف و وجود یک جسم با ضریب شکست بالا مناسب است. سیستم سایه‌نگاری شامل دو جزء اساسی منبع نور و بخش ضبط داده‌ها است.

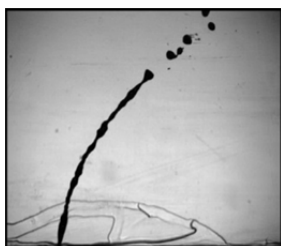
در شکل ۵، نحوه چیدمان ابزار اپتیکی برای نورپردازی سایه‌نگاری نشان داده شده است [18]. در این تحقیق، برای سیستم نوردهی از دستگاه فوتوفریزر ورژن ۲/۵ استفاده شده است. این سیستم نوردهی مجهز به یک دیود نوری توان بالا است و سیستم کنترلی آن با همزمان‌سازی بین دوربین متصل به ستاپ اپتیکی، قابلیت تنظیم بین زمان تصویربرداری و پالس نوری را ایجاد می‌کند. فرکانس پالس نوری ایجاد شده ماکزیمم ۱۰۰۰ هرتز بوده و پهنای پالس ایجاد شده تا ۱۲۵ نانوثانیه قابل تنظیم است. رزولوشن دوربین مورد استفاده برای ضبط تصاویر یک‌مگاپیکسل بوده که مجهز به لنز AF Micro-Nikkor 200mm f/4D IF-ED است [19].



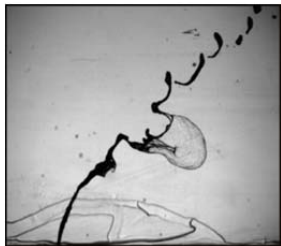
شکل ۵) شماتیک سیستم تصویربرداری [18]

به علت تغییر شکل صفحه مایع و بزرگ‌تر شدن آن، نیروی پسای اعمالی افزایش می‌یابد و متعاقب آن تمایل انحراف صفحه مایع به سمت جریان عرضی بیشتر می‌شود. با افزایش فشار پشت صفحه مایع، کیسه‌ها رشد می‌کنند و می‌پاشند. در واقع به وجود آمدن این کیسه یک حالت گذرا است که در یک لحظه کوتاه اتفاق می‌افتد و بلافاصله تبدیل به قطرات خواهد شد. اکثر این قطرات داری قطر بسیار کمی هستند، ولی در کناره‌های کیسه شاهد قطرات بزرگ‌تری نیز هستیم. نکته مهم در این رژیم عدم تبدیل صفحه مایع به جت مایع بر خلاف رژیم ستونی است. در آزمایشات انجام شده شکست کیسه‌ای در محدوده $We < 12/5$ شکست غالب است.

در جدول ۲، دسته‌بندی محدوده شکست‌های انجام شده برای صفحه مایع بر حسب عدد وبر بیان شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد وبر، رژیم‌های شکست تغییر می‌کند. تغییرات عدد وبر تاثیر بسیار بیشتری نسبت به تغییرات نسبت مومنتوم روی نوع شکست دارد.



الف

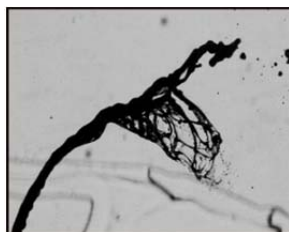
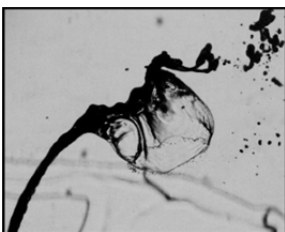


ب



ج

شکل ۶) تزریق صفحه مایع در وبرهای مختلف (الف) شکست ستونی $q = 37.12$ و $We_g = 1.64$ ، (ب) شکست ستونی کیسه‌ای $q = 30.1$ و $We_g = 4.4$ ، (ج) شکست کیسه‌ای $q = 57.72$ و $We_g = 5.52$



شکل ۷) نحوه تشکیل کیسه در جریان و فروپاشی آن

جدول ۲) دسته‌بندی انواع شکست صفحه مایع در جریان متقاطع

شکست ستونی	$We < 3/8$
شکست کیسه‌ای ستونی	$3/8 < We < 4/5$
شکست کیسه‌ای	$4/5 < We < 12/5$

تصویر گرفته شده برای هر پدیده، متوسط گرفته شده است. با استفاده از میانگین‌گیری، برخی از نوسانات موجود در پدیده پاشش حذف می‌شود. در قسمت‌های بعدی به ارایه نتایج به دست آمده از تاثیر اعداد بدون بعد مختلف بر ستون جت و نحوه شکست آن با استفاده از روش سایه‌نگاری می‌پردازیم.

۴-۱- انواع مکانیزم شکست در جت صفحه‌ای ناشی از جریان عرضی

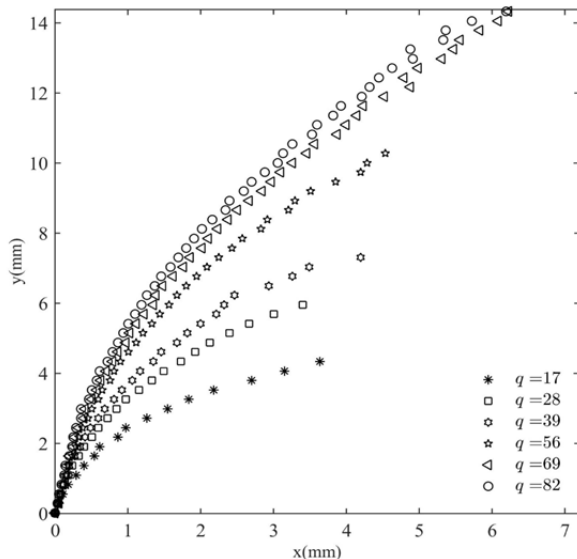
در تحلیل آزمایش‌های انجام شده، سه نوع مختلف از شکست ستون صفحه مایع دیده شد که تا حدودی این شکست‌ها همانند شکست‌های جت دایروی در جریان عرضی است. این سه نوع شکست عبارت از شکست ستونی، شکست ستونی کیسه‌ای و شکست کیسه‌ای هستند. شکسته شدن صفحه مایع به لیگامنت‌ها، اولین مرحله در شکست ستون جت بوده که این حالت برای صفحه مایع نیز صادق است. در این حالت گردابه‌های حاضر در جریان متقاطع سبب به وجود آمدن امواجی روی سطح ستون جت می‌شوند که یکی از دلایل شکست ستون مایع به لیگامنت‌ها است.

همان طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، اولین نوع شکست در جریان تزریق صفحه مایع داخل جریان عرضی، شکست ستونی است. در شکل ۶- الف، جریان هوا مسیر حرکت جت را خم می‌کند و در پایین دست جریان با رشد ناپایداری‌ها و امواج سطحی که روی سطح جت شکل گرفته‌اند، موجب شکست صفحه مایع به لیگامنت می‌شوند. در واقع علت اصلی شکست در این رژیم را وجود اغتشاشات در ستون مایع و تشکیل گردنه‌های باریک با طول موج مشخص عنوان کرد. این رژیم در محدوده وبرهای کمتر از $3/8$ اتفاق می‌افتد. با دقت در شکل ۶- الف می‌توان متوجه شد که در صورت پایین بودن سرعت هوا، مایع خروجی تغییر محور می‌دهد و می‌چرخد و بعد از گذشت زمانی کوتاه، صفحه مایع تبدیل به جت دایروی مایع می‌شود که این پدیده ناشی از اندرکنش میان نیروی کشش سطحی و نیروهای اینرسی عرضی است. تغییر محور در صفحه مایع موجب ناپایداری شدن جت و شکست سریع‌تر آن خواهد شد. در واقع پدیده تغییر محور شبیه به نوسان یک سیستم جرم و فنر است که دامنه تغییرات آن در گذر زمان افزایش می‌یابد و در نهایت می‌شکند.

رژیم فروپاشی بعدی که در نتایج مشاهده شد، ترکیب دو رژیم فروپاشی کیسه‌ای و فروپاشی ستونی است که در محدوده خاصی از نسبت مومنتوم و عدد وبر رخ می‌دهد. تصویر این رژیم در شکل ۶- ب قابل مشاهده است. همان طور که در شکل ۶- ب نمایش داده شده است، در اغلب موارد، شکست ستونی در انتهای جت و شکست کیسه‌ای در اواسط ستون جت اتفاق می‌افتد. همانند رژیم شکست ستونی، شکل ستون جت و انحراف آن به سمت جریان عرضی است. این رفتار به دلیل کاهش فشار گاز در طول وجوه صفحه مایع و نیز شتاب‌گیری گاز در عرض آن بوده و در این رژیم اختلاف قطر قطرات از هم بسیار زیاد است. محدوده عدد وبر در این رژیم بین $We < 4/5$ است.

با افزایش عدد وبر، جریان عرضی گردابه‌های تشکیل شده، منسجم‌تر و فاصله بین گره‌ها نسبت به پهنای صفحه مایع قابل مقایسه می‌شود و زمانی که صفحه مایع بین این گره‌ها پهن می‌شود نوع دیگری از شکست مشاهده می‌شود که یک لایه توخالی از سیال به شکل کیسه تبدیل خواهد شد (شکل ۶- ج). نمونه‌ای از این کیسه‌ها و نحوه تبدیل این پدیده به قطرات با جزئیات بیشتر در شکل ۷ نشان داده شده است. اساس تشکیل این کیسه‌ها، تغییر شکل قسمت مرکزی صفحه مایع (بین گره‌ها) است که

مومنتموم سبب کاهش طول لازم برای محفظه و در مقابل افزایش قطر محفظه می‌شود. برای نشان دادن روند کلی تاثیر نسبت مومنتموم روی نفوذ صفحه مایع در جریان عرضی از تصاویر به‌دست‌آمده، میانگین‌گیری و متوسط مرز جلویی جت‌ها در نمودار ۱ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در قطر انژکتور یکسان و وبر مساوی با افزایش نسبت مومنتموم، عمق نفوذ رشد پیدا می‌کند.



نمودار ۱) تاثیر نسبت مومنتموم بر مسیر حرکت جت

۲-۲-۴- تاثیر عدد وبر بر رفتار ستون جت

در شکل ۹، تاثیر عدد وبر بر رفتار ستون جت نشان داده شده است. در شکل ۹- الف، مقادیر نسبت مومنتموم و عدد وبر به ترتیب برابر با $56/7$ و $9/42$ بوده و این مقادیر برای شکل ۹- ب برابر با $57/29$ و $3/84$ است. با ثابت ماندن تقریبی نسبت مومنتموم می‌توان نتیجه گرفت که عمق نفوذ برای هر دو شرایط یکسان است و در نتیجه تغییرات عدد وبر تاثیری بر عمق نفوذ جت نخواهد داشت. با افزایش عدد وبر در یک نسبت مومنتموم تقریباً برابر، دامنه موج حاکم روی ستون مایع رشد می‌کند و منجر به افزایش سرعت شکست می‌شود. با توجه به نتایج مشاهده شده در آزمایش، در نسبت مومنتموم ثابت، اعداد وبر گاز بالاتر، توزیع چگالی مطلوب‌تری را در مقایسه با اعداد وبر پایین نتیجه می‌دهند که در محفظه احتراق مطلوب است.

همچنین افزایش عدد وبر گاز باعث تولید سریع‌تر قطرات ریزتر می‌شود که این امر با توجه به افزایش سرعت جریان گاز و متعاقباً افزایش نیروی آیرودینامیک وارد شده به مایع کاملاً طبیعی است. تاثیر عدد وبر بر مسیر جت در نسبت مومنتموم ثابت و قطر انژکتور یکسان در نمودار ۲ نشان داده شده است. همان طور که قبلاً نتیجه‌گیری شد، مسیر شکست صفحه مایع تقریباً مستقل از عدد وبر است. رایبه رابطه تجربی برای مسیر حرکت صفحه مایع براساس اعداد بی‌بعد کمک شایانی در مسایل صنعتی خواهد کرد. علاوه بر موارد تاثیرگذار بر مسیر حرکت جت مایع که در قسمت‌های قبلی به آنها اشاره کردیم، موارد دیگری نیز بر مسیر حرکت جت تاثیرگذار هستند که در این تحقیق به مطالعه جداگانه این تاثیرات پرداخته نشده است. این پارامترها را می‌توان به مشخصه‌های انژکتور از قبیل ضریب تخلیه، نسبت طول به قطر خروجی انژکتور، زاویه جمع‌شدگی، تغییرات نسبت ویسکوزیته دو سیال، نسبت چگالی

با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با محدوده شکست رایبه‌شده توسط محققان برای جت دایروی می‌توان متوجه شد که رژیم‌های شکست این دو روش با هم تفاوت دارند و محدوده تعریف‌شده برای رژیم‌ها براساس وبر متمایز است.

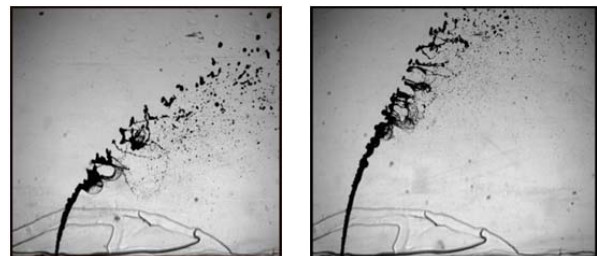
۲-۴- مسیر حرکت ستون جت

یکی از پارامترهای مهم در مطالعه جریان‌های متقاطع، تعیین مسیر حرکت ستون جت است. تاکنون چندین روش مختلف برای تعریف مسیر حرکت جت توسط محققان برای جت تزریق‌شده داخل جریان رایبه شده است. طبیعت ناپایدار جریان صفحه مایع در جریان عمودی گاز، سبب به‌وجود آمدن ساختارهای پیچیده گردابه‌ای و نوسانی می‌شود که این غیریکنواختی سبب به‌وجود آمدن مشکلاتی در تعریف مرزهای ستون جت می‌شود. در تمامی این روش‌ها برای حذف ناپایداری‌های موجود در این جریان‌ها از تصاویر میانگین‌گیری شده استفاده شده است. پس از میانگین‌گیری از تمام تصاویر، سه انتخاب برای تعیین مرز داریم. مرز جلویی ستون جت که در مواجهه با جریان هوای متقاطع قرار خواهد گرفت. مرز پشتی ستون جت که در سمت مخالف جریان هوا قرار دارد و مرز دیگری که در این جریان تعریف می‌شود، مرز وسط ستون جت بوده که فاصله آن از هر یک از ستون‌های جلویی و پشتی به یک فاصله است.

در این تحقیق از مرز جلویی جت به‌عنوان تعریف جت استفاده شده است. علت انتخاب مرز جلویی در کار حاضر تاثیرپذیری این مرز بر اثر تغییر پارامترهای مختلف و وجود کارهای انجام‌شده بیشتر در این زمینه برای جت در مقایسه با روش‌های دیگر است.

۲-۲-۴- تاثیر نسبت مومنتموم بر رفتار ستون جت

از تاثیرگذارترین پارامترها بر ستون صفحه مایع که نقش اساسی در نفوذ، طول شکست و تعیین مسیر دارد، تاثیر نسبت مومنتموم است. در شکل ۸ نمونه‌ای از تاثیر این پارامتر بر نفوذ نشان داده شده است.

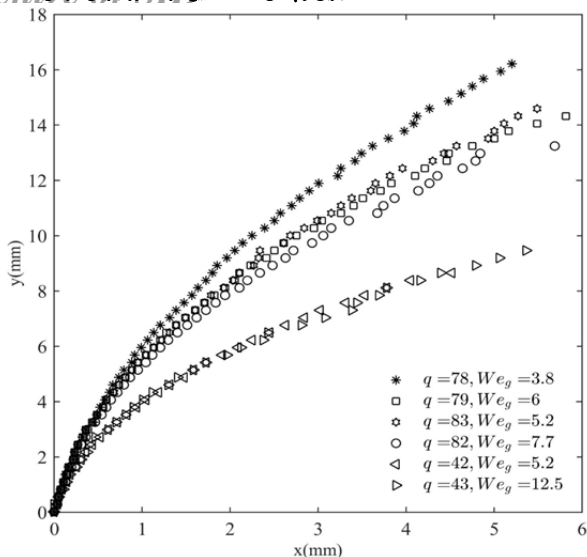


الف

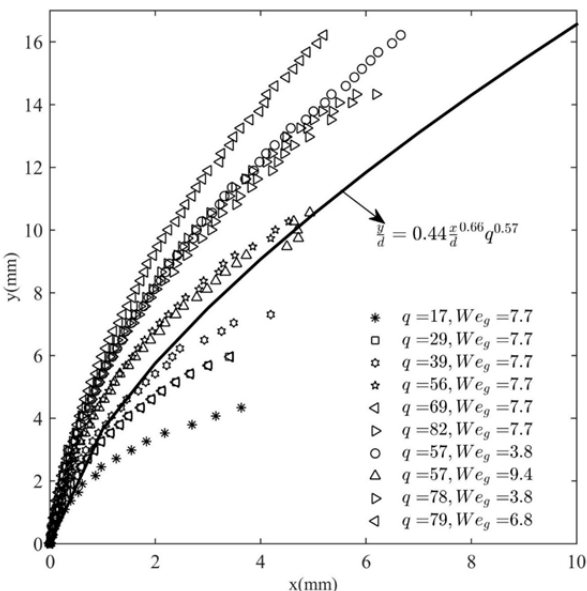
ب

شکل ۸) تاثیر نسبت مومنتموم بر نفوذ جت داخل جریان: الف) $q = 38.95$ و $We_g = 7.72$ ب) $q = 83.4$ و $We_g = 7.72$

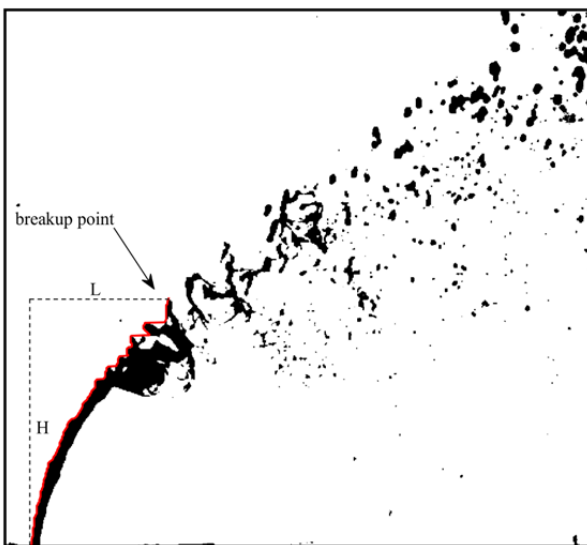
در شکل ۸- الف، رفتار ستون جت برای نسبت مومنتموم $38/95$ و در شکل ۸- ب رفتار ستون جت برای همان عدد وبر و نسبت مومنتموم $83/4$ نشان داده شده، در واقع سرعت مایع خروجی از انژکتور از 6 به $8/7$ متر بر ثانیه تغییر یافته است. همان طور که در شکل ۸ قابل ملاحظه است، با افزایش نسبت مومنتموم، ارتفاع جت در جریان هوا افزایش می‌یابد. این افزایش عمق نفوذ سبب تاخیر در خم شدن جت می‌شود. با افزایش نسبت مومنتموم علاوه بر افزایش عمق نفوذ، اندازه قطرات و لیگامنت‌ها کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر در یک محفظه احتراق افزایش نسبت مومنتموم، شعله تشکیل‌شده را از دیواره‌های کناری دورتر و در راستای محوری، شعله را به انژکتور نزدیک‌تر می‌کند. در نتیجه افزایش نسبت



نمودار (۲) تاثیر عدد وبر بر مسیر حرکت جت



نمودار (۳) مسیر جت به ازای شرایط کارکردی مختلف



شکل (۱۰) شماتیک طول و ارتفاع شکست اولیه صفحه مایع

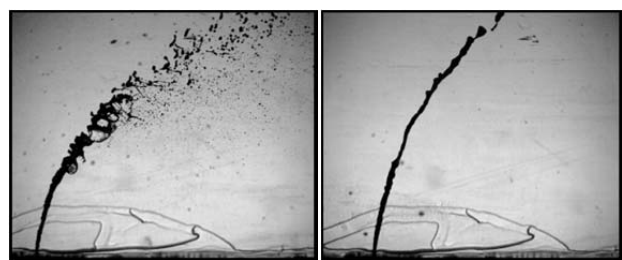
دو سیال، نسبت دما و فشار دو سیال و همچنین پارامترهایی از قبیل درجه شدت آشفته‌گی هر یک از فازهای مایع و گاز و ابعاد تونل باد مورد استفاده دسته‌بندی نمود. تا به امروز پژوهشگران سه شکل مختلف را برای رابطه تعیین مسیر حرکت جت ارائه کرده‌اند. این سه رابطه عبارت از رابطه توانی، لگاریتمی و نمایی هستند. روش استفاده شده در این تحقیق رابطه توانی است. رابطه به‌دست آمده برای مسیر جت از طریق رگرسیون به صورت معادله ۱ است.

$$\frac{y}{d} = 0.44 \frac{x^{0.66}}{d} q^{0.57} \quad (1)$$

بر اساس رابطه ۱، افزایش نسبت مومنتوم ارتفاع مسیر جت بدون بُعد شده را افزایش می‌دهد. در نمودار ۳، رگرسیون معرفی شده به‌ازای $q=39$ در کنار نتایج تجربی نشان داده شده است.

۴-۳- طول و ارتفاع شکست جت

شروع ناحیه اسپری یا ناحیه گذر شکست اولیه صفحه مایع به شکست ثانویه، یکی از موارد مهم در تحلیل مسایل مرتبط با انژکتورها در انواع کاربردهای مختلف از جمله جریان متقاطع است. نقطه شروع این ناحیه را نقطه شکست ستون جت می‌نامیم. شکسته شدن جت به دلیل ماهیت بسیار غیریکنواخت آن در یک نقطه ثابت رخ نمی‌دهد. به همین دلیل در این تحقیق، محل شکست ستون جت را به صورت میانگین شروع محل تشکیل لیگامنت‌ها یا قطراتی در نظر گرفته‌ایم که از سطح ستون صفحه مایع جدا می‌شوند. در شکل ۱۰، چگونگی پردازش تصویر یک نمونه از جت واپاشیده شده قابل مشاهده است. در این شکل طول و ارتفاع شکست جت به ترتیب L و H نشان داده شده است. در نمودار ۴، محل شکست ستون صفحه مایع در راستای جریان هوا به‌ازای نسبت مومنتوم و اعداد وبر مختلف آورده شده است. همان طور که در نمودار ۴ مشاهده می‌شود، نسبت بدون بعد طول شکست در جهت جریان هوا مقداری تقریباً ثابت دارد و نسبت به تغییرات مومنتوم حساس نیست. در نتیجه، هر چه قطر انژکتور بزرگ‌تر شود، ستون مایع در فاصله بیشتری از محل تزریق جت شکسته خواهد شد که این پارامتر می‌تواند پارامتر مهمی در تعیین طول محفظه‌های احتراق باشد. محل شکست ستون جت در راستای عمودی و به صورت بدون بُعد شده بر حسب نسبت مومنتوم مایع به هوا در نمودار ۵ نشان داده شده است. به‌دست آوردن محل شکست جت در راستای تزریق جت نیز در جریان‌های متقاطع از اهمیت خاصی برخوردار است. زیرا این پارامتر نقش مهمی در طراحی شعاع یک محفظه احتراق دارد. نمودار ۵ نشان می‌دهد که با افزایش نسبت مومنتوم، ارتفاع بدون بُعد شده نقطه شکست افزایش خواهد یافت. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که ارتفاع نقطه شکست بی‌بُعد شده، مستقل از پارامترهای دیگر بوده و تنها به نسبت مومنتوم مایع و هوا وابسته است.



الف

ب

شکل (۹) تاثیر عدد وبر بر نفوذ جت داخل جریان؛ الف) $q = 56.7$ و $We_g = 3.84$ ب) $q = 57.29$ و $We_g = 9.42$

آزمایش است.

۵- مسیر حرکت جت در راستای ارتفاع را به کمیت‌های نسبت مومنتوم، قطر و مختصات طولی جت مرتبط نمودیم. مشاهده شد که با افزایش نسبت مومنتوم، مقدار نفوذ جت در جریان متقاطع افزایش می‌یابد.

۶- با استفاده از یک رگرسیون خطی چندمتغیره، تاثیر هر یک از پارامترهای قطر انژکتور، نسبت مومنتوم و عدد وبر را بر مسیر حرکت جت به دست آوردیم که می‌توان از آن برای پیش‌بینی مسیر حرکت جت استفاده نمود.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مقاله از شرکت "آرسین‌تابش‌نگاران فناوری" به دلیل در اختیار قراردادن دستگاه فوتوفریز نسخه ۲/۵ کمال تشکر را دارد. همچنین از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف برای تامین بودجه پژوهشی تحقیق حاضر به شماره G950411 قدردانی می‌شود.

تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

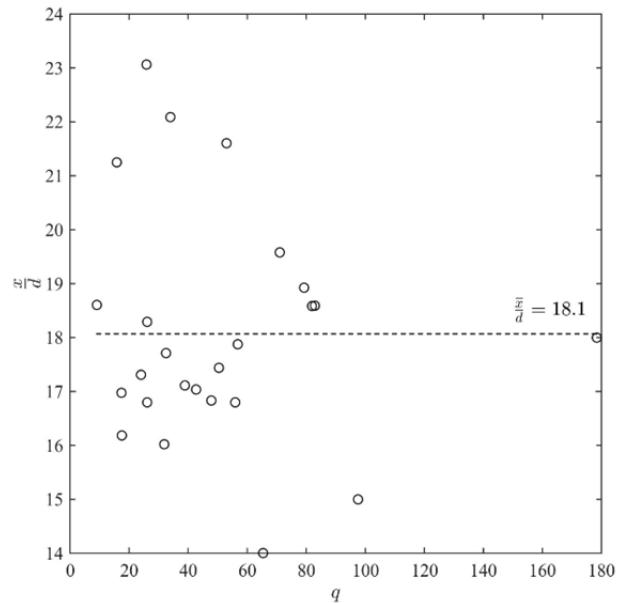
تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

سهم نویسندگان: قادر علیائی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪); آزاده کبریایی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)

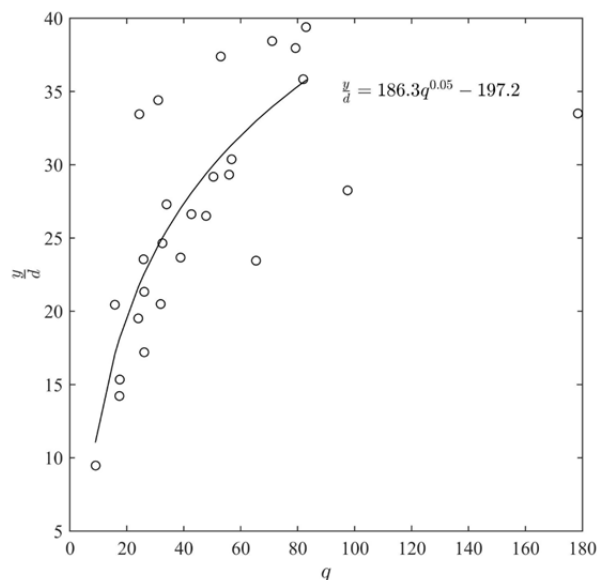
منابع مالی: منابع مالی با استفاده از بودجه پژوهشی در اختیار گذارده شده توسط معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف، تامین شد.

منابع

- 1- Zhao H, Liu HF, Li WF, Xu JL. Morphological classification of low viscosity drop bag breakup in a continuous air jet stream. *Physics of Fluids*. 2010;22(11):114103.
- 2- Fric TF, Roshko A. Vortical structure in the wake of a transverse jet. *Journal of Fluid Mechanics*. 1994;279(1):1-47.
- 3- Less DM, Schetz JA. Transient behavior of liquid jets injected normal to a high-velocity gas stream. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. 1986;24(12):1979-1986.
- 4- Zheng Y, Marshall AW. Characterization of the initial spray from low-Weber-number jets in crossflow. *Atomization and Sprays*. 2011;21(7):575-589.
- 5- Lee CH, Reitz RD. An experimental study of the effect of gas density on the distortion and breakup mechanism of drops in high speed gas stream. *International Journal of Multiphase Flow*. 2000;26(2):229-244.
- 6- Lightfoot M. Fundamental classification of atomization processes. *Atomization and Sprays*. 2009;19(11):1065-1104.
- 7- Yoshinaga T. Instability and breakup of a gas-cored viscous annular jet. *AIP Conference Proceedings*. 2012;1474(1):119-122.
- 8- Wu PK, Kirkendall KA, Fuller RP, Nejad AS. Breakup processes of liquid jets in subsonic crossflows. 32nd Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1-3 July, 1996, Lake Buena Vista, Florida, USA. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 1996.
- 9- Birouk M, Azzopardi BJ, Stähler T. Primary break-up of a viscous liquid jet in a cross airflow. *Particle and Particle Systems Characterization*. 2003;20(4):283-289.



نمودار ۴) تاثیر نسبت مومنتوم بر طول شکست ستون مایع



نمودار ۵) تاثیر نسبت مومنتوم بر ارتفاع شکست ستون مایع

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از تکنیک سایه‌نگاری، مشخصه‌های جریان مایع تزریق شده در جریان عرضی به صورت متقاطع بررسی شد. با بررسی آزمایشات صورت گرفته در شرایط مختلف نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- مهم‌ترین پارامتر در تعیین رژیم‌های شکست اولیه صفحه مایع در جریان عرضی، عدد وبر است که با تغییر آن رژیم‌های شکست جریان تغییر می‌یابد و همچنین قطر قطرات متفاوت خواهد بود.
- ۲- مکانیزم‌های شکست صفحه مایع به سه دسته ستونی، ستونی-کیسه‌ای و کیسه‌ای تقسیم‌بندی شد.
- ۳- افزایش نسبت مومنتوم موجب تاخیر در خم شدن جت و در نتیجه منجر به افزایش ارتفاع قابل نفوذ برای جت مایع می‌شود که در طراحی محفظه‌های احتراق نقش کلیدی دارد.
- ۴- با افزایش نسبت مومنتوم، طول شکست بدون بعد ثابت باقی می‌ماند و طول شکست بدون بُعد شده مستقل از تمامی شرایط

2012, Heidelberg, Germany. Danbury: Begell House; 2012.

15- Amighi A. Liquid jets in crossflow at elevated temperatures and pressures [Dissertation]. Toronto: University of Toronto; 2015.

16- Akhavan Ansari R, Ommi F, Movahednejad E. An experimental study of liquid jet into a crossflow, based on schlieren technique. *Fluid Mechanics and Aerodynamics Journal*. 2016;5(1):17-27. [Persian]

17- Jalili B, Ommi F, Nourazar S. Experimental study of effective factors on liquid jet trajectory and breakup in gaseous crossflow. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(12):354-360. [Persian]

18- Nasiri HR, Kebriaee A, Razavi Haeri SAA. Design and manufacture of powerful diode stroboscopes for staging fast phenomena. 1st International Conference on New Research Achievements in Mechanics, 26 May, 2016, Tehran. Tehran: Civilica; 2016. [Persian]

19- ArsinTNF. Enlighten brighter than light. Tehran: ArsinTNF Company; 2017 [2018 May 01]. Available from: www.Arsin.co

10- Aalburg Ch, Sallam K, Faeth G. Properties of nonturbulent round liquid jets in uniform crossflows. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 5-8 January, 2004, Reno, Nevada. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2004.

11- Sankarakrishnan R, Sallam KA, Chambers FW. Effects of turbulence on the breakup of round liquid jets in gaseous crossflow. ASME 2005 Fluids Engineering Division Summer Meeting, June 19-23, 2005, Houston, Texas, USA, 2005. New York: American Society of Mechanical Engineers (ASME); 2005. p. 281-285.

12- Iyogun CO, Birouk M, Popplewell N. Trajectory of water jet exposed to low subsonic cross-flow. *Atomization and Sprays*. 2006;16(8):963-980.

13- Lakhamraju RR. Liquid jet breakup studies in subsonic air stream at elevated temperatures [Dissertation]. Cincinnati: University of Cincinnati; 2005.

14- Kim JH, Ku KW, Youn HJ, Hong JG, Lee CW, Chung KY. Effect of orifice configuration on the penetration height in crossflow. 12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2-6 September,