

مقایسه تجربی مشخصه‌های جریان و شکست جت‌های آب مستطیلی و بیضوی

امین جابری*، مهران تاج فر، آرمین شیدانی

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۲۲
بازنگری: ۱۳۹۶/۱۱/۱۸
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۰۲
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۲/۱۰

کلمات کلیدی:

جت مایع
جت بیضوی
جت مستطیلی
پدیده تغییر محور
شکست ستون جت

خلاصه: مشخصه‌های جریان جت‌های آب مستطیلی و بیضوی به صورت تجربی بررسی و مقایسه شده است. دو انژکتور مستطیلی و بیضوی با مساحت‌های خروجی یکسان و با ضریب منطری ۲ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و همچنین از یک انژکتور دایروی به عنوان هندسه مرجع نیز استفاده شده است. از روش سایه نگاری برای آشکارسازی جریان جت بهره گرفته شده و تصاویر جریان به کمک یک دوربین سرعت بالا ثبت شده است. آزمایش‌ها برای دبی‌های جرمی بین ۲ لیتر بر ساعت تا ۱۲۰ لیتر بر ساعت که متناظر با اعداد وبر بین ۰/۵ تا تقریباً ۱۱۰۰ می‌باشد، انجام شده است. رفتار فیزیکی جریان جت‌های دایروی، مستطیلی و بیضوی در رژیم‌های مختلف با بهره‌گیری از تصاویر آشکارسازی مورد مطالعه قرار گرفته و همچنین با کمک نمودار پایداری، رفتار جت‌ها بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که جت بیضوی دارای کمترین پایداری در رژیم ریلی است و زودتر از دو جت دیگر به نقطه بحرانی می‌رسد. در حالی که نقطه بحرانی انژکتورهای دایروی و مستطیلی اختلاف کمی از همدیگر را نشان می‌دهد. همچنین پدیده تغییر محور به عنوان مهمترین مشخصه فیزیکی جت‌های مستطیلی و بیضوی بررسی شده است. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که برای هر دو هندسه، طول موج تغییر محور به صورت خطی با افزایش سرعت افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

پیشینه تحقیق بر روی نازل‌های تزریق جت مایع به قرن نوزدهم میلادی باز می‌گردد. زمانی که برای ساخت اولین داروهای تنفسی نیاز به تبدیل دارو از شکل مایع به اسپری وجود داشت. با گذشت بیش از دو سده، شکست جت مایع و پاشش آن کاربردهای فراوان و متنوعی در صنایع مختلف پیدا کرده است. به عنوان مثال می‌توان به پاشش رنگ در صنایع رنگ آمیزی، پاشش سوخت در موتورهای احتراقی، کنترلگر ماهواره‌ها، تزریق جوهر در چاپگرها و انژکتورهای پاشش آب در صنایع کشاورزی و موارد گوناگون دیگر اشاره کرد. افزایش روزافزون کاربرد جت مایع باعث شده است که با وجود تحقیقات گسترده‌ای که بر روی آن انجام شده است، هنوز هم از موضوعات داغ محافل علمی به شمار رود و گروه‌های تحقیقاتی مختلفی به مطالعه آن بپردازند.

از نظر تاریخی اولین تحقیقات بر روی جت مایع را ساواری [۱]،

پلاتو [۲]، مگنس [۳] و ریلی [۴ و ۵] انجام داده‌اند که نتایج کار آنها در بوگی [۶] و ریتر [۷] به طور کامل گزارش شده است. با نادیده گرفتن اثرات گاز محیط (گازی که جت به درون آن تزریق می‌شود)، اثرات ویسکوزیته جت مایع و همچنین نیروی گرانشی، لرد ریلی تئوری پایداری خطی خود را ارائه کرد و نشان داد که اگر تنها نیروهای مویبندی در نظر گرفته شوند، یک جت دایروی زمانی ناپایدار می‌شود که در معرض اغتشاشات متقارن با طول موج بزرگتر از محیط جت قرار بگیرد. تئوری لرد ریلی توسط وبر [۸] توسعه یافت و با در نظر گرفتن اثرات لزجت مایع و چگالی گاز محیط، نتیجه گرفت که اثرات لزجت همواره باعث افزایش طول موج اغتشاشی می‌شود که به ازای آن شکست جت مایع آغاز می‌شود. نتایج وبر بعدها توسط استرلینگ و اسلیچر [۹] مورد اعتبارسنجی قرار گرفته و نشان دادند که تئوری وبر از صحت لازم برخوردار نیست. همچنین تیلور [۱۰] نشان داد که چگالی گاز محیط می‌تواند اثرات قابل توجهی بر روی شکست جت مایع داشته باشد.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ajaberi@aut.ac.ir



مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه همین کار، وانگ و فانگ [۱۳] با استفاده از همان نازل‌ها، به صورت دقیق‌تر به بحث در مورد پدیده تغییر موج پرداخته‌اند و نشان می‌دهند که برای نازل‌های مربعی و سه گوش این پدیده رخ نمی‌دهد. این نتیجه توسط راجش و همکاران [۲۰] نقض می‌شود که با بررسی نازل‌های سه گوش و مربعی در سرعت‌های پایین نشان می‌دهند پدیده تغییر محور در این نازل‌ها نیز رخ می‌دهد.

بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه کاملی بر روی نازل‌های مستطیلی انجام نشده است. کونکاچابو و همکاران [۲۱] به بررسی شیارهای مستطیلی با کاربرد خاص در راکتورهای هسته‌ای می‌پردازد و از فلز مذاب به عنوان مایع استفاده می‌کند. در کاری دیگر، نگید و همکاران [۲۲] به بررسی تجربی صفحه مایع تشکیل شده از چهار شیار مستطیلی با گوشه‌هایی دایروی پرداخته است. در هیچ یک از این پژوهش‌های پارامترهای اصلی ناپایداری ستون جت بررسی نشده است. پیشینه مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که هنوز مطالعه کاملی بر روی تزریق جت مایع از نازل‌های مستطیلی صورت نگرفته و بنابراین ناپایداری‌های آن نیاز به بررسی بیشتر دارد. از طرفی با توجه به رفتارهای مشابه جت‌های بیضی و مستطیلی، مقایسه بین این دو هندسه ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله قصد داریم با بررسی دو جت بیضی و مستطیلی و با استفاده از آب به عنوان مایع جت، ناپایداری این جت‌های غیردایروی را پس از تزریق به درون اتمسفر ساکن را مورد آزمایش قرار داده و مشخصه‌های ناپایداری جریان را به صورت کمی و کیفی تحلیل کنیم.

۲- تجهیزات تجربی، عکس برداری و پردازش تصویر

در این بخش به ترتیب به سامانه تزریق جت آب، انژکتور روش عکس برداری و پردازش تصویر پرداخته می‌شود.

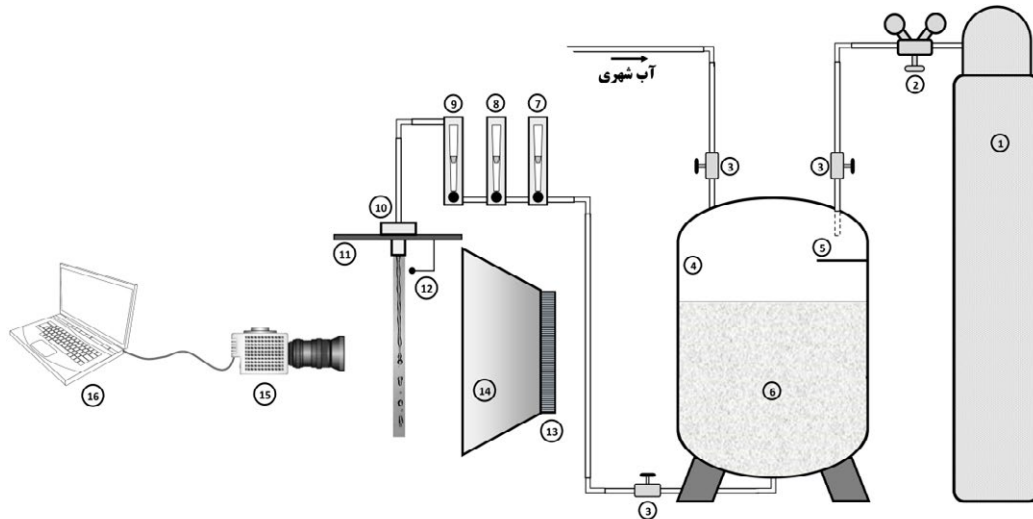
۲-۱- سامانه تزریق جت آب

اجزای مختلف سامانه تزریق جت آب به صورت طرحواره در شکل ۱ آمده است. در این پژوهش از یک مخزن مایع تحت فشار به عنوان منبع تزریق مایع استفاده شده است. در این پژوهش برای پر کردن مخزن از آب شهری استفاده شده که با فاصله زمانی مناسب قبل از

مشخصه‌های تزریق جت مایع به درون یک محیط گازی و رشد ناپایداری‌های آن به پارامترهای گوناگونی وابسته است. با این همه چنان که در مقاله مروری بیروک و لیکیک [۱۱] اشاره شده است، هندسه نازل از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر رفتار جت مایع است که هنوز بسیار از جنبه‌های آن مورد بررسی قرار نگرفته است. در میان تمامی پارامترهای هندسی یک نازل، هندسه نازل خروجی دارای بالاترین اهمیت است که می‌تواند باعث ایجاد بیشترین تغییرات در شکل ستون جت مایع شود. در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده، جت‌های دایروی بررسی شده‌اند و جت‌های غیردایروی کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. جت‌های غیردایروی می‌تواند شامل هندسه‌های سه گوش، مربع، مستطیل، بیضی و غیره باشد که هر کدام دارای ویژگی‌های خاص خود هستند که باید یک به یک مورد مطالعه قرار بگیرند. از دیدگاه احتراقی، جت‌های غیردایروی با افزایش اختلاط سوخت، می‌توانند باعث بهبودی عملکرد احتراق و کاهش ناپایداری‌های آن شوند [۱۲]. بنابراین می‌توان از نازل‌های غیردایروی به عنوان عملگرهای غیرفعال در کاربردهای ویژه استفاده کرد [۱۳]. از نظر مطالعاتی، در برخی از هندسه‌های غیردایروی همچون بیضی و مستطیلی پدیده تغییر محور رخ می‌دهد که بررسی فیزیک این پدیده بسیار مورد توجه بوده است.

در میان محدود مطالعات صورت گرفته بر روی هندسه‌های غیر دایروی، عمده فعالیت‌ها بر روی نازل‌های بیضی بوده است. کاسیپ و همکاران [۱۴] به بررسی تجربی نازل‌های بیضی پرداختند. در این پژوهش ۶ نازل بیضی با ضرایب منطری مختلف به همراه ۲ اریفیس دایروی به عنوان نازل مرجع، آزمایش شدند. در ادامه همین کار، کاسیپ و همکاران [۱۵] با استفاده از همین نازل‌ها و تنها با اضافه کردن مخلوطی یک به یک از آب-گلیسرین به عنوان مایع جت در کنار آب، به بررسی اثرات مایع بر روی مشخصه‌های نازل‌های بیضی پرداختند. همچنین امینی و دولت آبادی [۱۶] و شیپو و همکاران [۱۷] اخیراً به بررسی تحلیلی اثرات اغتشاش بر روی جت‌های بیضی پرداختند. جت بیضی به صورت عددی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است که می‌توان به پژوهش اخیر مراد و نصیری [۱۸] اشاره کرد.

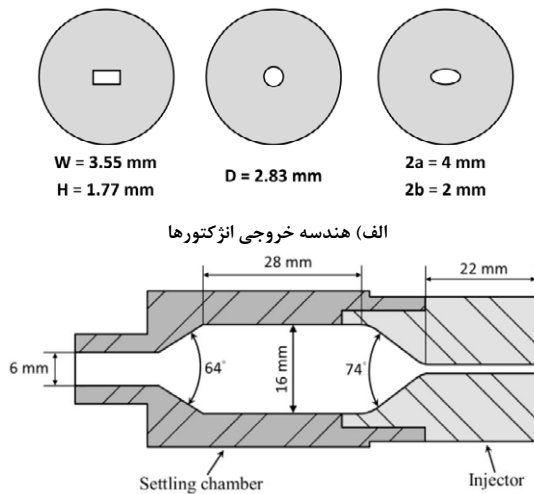
از میان دیگر نازل‌های غیردایروی، شارما و فانگ [۱۹] به صورت تجربی ناپایداری جت آب از چهار نازل دایروی، مستطیلی، مربعی و سه گوش را بررسی کرده‌اند. در این مقاله جت آب با فشار بسیار بالا



- | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------------|-------------|--------------------|----------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|----------------------------|------------------|------------------|-----------------------|----------------------|------------------|
| ۱- کپسول نیتروژن پرفشار | ۲- تنظیم کننده فشار | ۳- شیر گازی | ۴- مخزن ذخیره مایع | ۵- صفحه جداساز | ۶- مایع آزمایش (آب) | ۷- جریان سنج دی-پایین | ۸- جریان سنج دی-متوسط | ۹- جریان سنج دی-بالا | ۱۰- سیستم انژکتور | ۱۱- صفحه نصب سیستم انژکتور | ۱۲- نشانگر پیکسل | ۱۳- منبع نور LED | ۱۴- یکنواخت کننده نور | ۱۵- دوربین سرعت بالا | ۱۶- پردازش تصویر |
|-------------------------|---------------------|-------------|--------------------|----------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|----------------------------|------------------|------------------|-----------------------|----------------------|------------------|

شکل ۱: سامانه تزریق جت مایع

Fig. 1: Liquid jet injection system



الف) هندسه خروجی انژکتورها

ب) ساختار انژکتور و قرارگیری آن در محفظه آرامش

شکل ۲: جزئیات هندسی سامانه انژکتورها

Fig. 2a: Exit geometry of the injectors

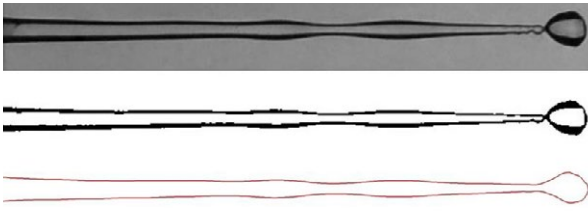
Fig. 2b: Injector configuration and its accommodation into the settling chamber

به منظور جلوگیری از زنگ زدگی، انژکتورها از جنس استیل ساخت شده‌اند. با توجه به ابعاد انژکتورها، از روش ماشین کاری برش سیم برای ایجاد هندسه مورد نظر با دقت بالا استفاده شد. به منظور میرا کردن ناپایداری‌های احتمالی جریان، محفظه آرامشی به طول و قطر ۲۸/۳۳ و ۱۶ میلی‌متر قبل از ورود جریان به انژکتور تعبیه شده است.

شروع هر آزمایش، مخزن تا ارتفاع مشخص پر شده تا مایع درون مخزن به طور کامل پایا شود. همچنین یک صفحه جداساز درون مخزن تعبیه شده که از برخورد مستقیم جریان گاز پرفشار با مایع جلوگیری می‌کند و احتمال هر گونه اختلاط ناخواسته بین گاز و مایع را از بین می‌برد. جریان جت مایع توسط یک شیر گازی قطع و وصل شده و مقدار دبی آن توسط یک شیر سوزنی کنترل می‌شود. از سه فلومتر با بازه‌های کاری مختلف برای اندازه‌گیری دبی جریان آب استفاده شده است. این سه فلومتر که به صورت موازی در مدار قرار گرفته‌اند، قادر به اندازه‌گیری دبی جریان در بازه‌های ۴ تا ۴۴ لیتر بر ساعت، ۲۰ تا ۱۶۰ لیتر بر ساعت و ۱۲۰ تا ۳۶۰ لیتر بر ساعت می‌باشند.

۲-۲- انژکتورها

به منظور مقایسه بین هندسه‌های بیضوی و مستطیلی، دو انژکتور با ضرایب منطری و مساحت سطح خروجی یکسان ساخته شد و همچنین یک انژکتور دایروی با مساحت سطح خروجی برابر با دو انژکتور دیگر، به عنوان هندسه مرجع به کار گرفته شد. جزئیات کامل هندسی این انژکتورها در شکل ۲ الف) نمایش داده شده است.



شکل ۳: فرآیند پردازش تصویر. بالا) تصویر اصلی، وسط) شناسایی جت، پایین) منحنی جت

Fig. 3: Image processing procedure. upper) raw photo, middle) jet recognition, lower) jet profile

ستون جت همانند طول شکست، قطر جت، طول موج تغییر محور و غیره را به دست آورد. نهایتاً به کمک بعد فیزیکی به دست آمده در مسیر اول پردازش تصویر، تعداد پیکسل به دست آمده برای هر پارامتر به طول فیزیکی تبدیل می‌شود.

۳- نتایج و بحث

به منظور بررسی کامل رفتار انژکتورهای بیضوی و مستطیلی، آزمایش‌هایی برای بازه گسترده‌ای از دبی جرمی آب انجام شده است. در تمامی آزمایش‌ها دبی جرمی جت آب از مقادیر نزدیک به ۱ گرم بر ثانیه تا ۳۳ گرم بر ثانیه تغییر کرده است. در حوزه پژوهش‌های انجام شده بر روی تزریق جت مایع به درون محیط گازی، معمولاً به جای استفاده از متغیرهای سرعت یا دبی جرمی، از پارامتر بدون بعد عدد وبر استفاده می‌شود. عدد وبر از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$We = \frac{\rho V^2 D}{\sigma} \quad (1)$$

که در این رابطه ρ چگالی مایع، V سرعت جت، D قطر معادل انژکتور و σ تنش سطحی مایع می‌باشد. در شکل ۴ تغییرات عدد وبر با دبی جرمی برای هر سه انژکتور نشان داده شده است. با وجود یکسان بودن مساحت سطح هر سه انژکتور، به دلیل کوچکتر بودن قطر معادل انژکتور مستطیلی از دو انژکتور دیگر، عدد وبر به دست آمده برای انژکتور مستطیلی در یک دبی جرمی مشخص کمتر از دو انژکتور دیگر است. محیط هندسه بیضوی از رابطه (۲) محاسبه شده است. در این رابطه داریم که:

$$P_e = \pi \left[3(a+b) - \sqrt{(3a+b)(a+3b)} \right] \quad (2)$$

ساختار کامل انژکتور و نحوه قرارگیری آن درون محفظه آرامش در شکل ۲ (ب) نشان داده شده است. باید اشاره شود که دقت لازم برای جلوگیری از ایجاد پله در نقطه اتصال این دو بخش به کار گرفته شده است.

۳-۲- روش ثبت تصاویر

روش سایه‌برداری برای ثبت تصاویر جت آب به کار برده شده است. وضعیت قرارگیری دوربین و منبع نور نسبت به ستون جت در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به بسامد بالای پدیده‌های حاضر در تزریق جت آب، نیاز به استفاده از دوربینی با توانایی عکسبرداری با سرعت بالا می‌باشد. بدین منظور از دوربین نیکون ۱ J4 استفاده شد که قادر به ثبت تصاویر با مدت زمان نورگیری ۶۲/۵ میکروثانیه می‌باشد. همچنین این دوربین امکان تصویربرداری با بسامد ۲۰ هرترز و با وضوح تصویر ۳۴۸۸×۵۲۳۲ را نیز مهیا می‌سازد. به منظور بهبود کیفیت تصاویر، دوربین به یک لنز نیکور ۳۰-۱۰ با قابلیت بزرگنمایی ۳ برابر مجهز شده است. در هر شرایط آزمایش، بیش از ۱۰۰ عکس‌برداری انجام شده و نتایج ارائه شده میانگین همه تصاویر ثبت شده می‌باشد.

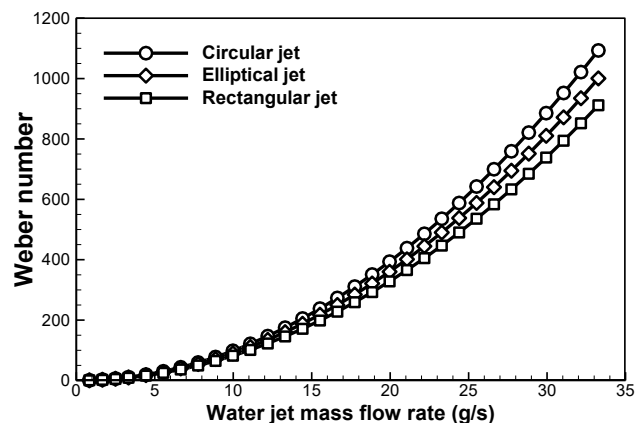
۴-۲- پردازش تصویر

پس از عکس‌برداری، تصاویر ثبت شده باید مورد پردازش قرار بگیرند تا امکان به دست آوردن داده‌های مورد نیاز فراهم شود. بدین منظور یک کد با نرم افزار تجاری متلب نوشته شده که امکان پردازش تصاویر را میسر می‌سازد. پردازش تصاویر در دو مسیر انجام می‌شود. در مسیر اول ابعاد فیزیکی یک پیکسل از هر تصویر باید مشخص شود. در حین انجام آزمایش، یک نشانگر با ابعاد مشخص در کنار ستون جت قرار می‌گیرد که سایه آن نیز در کنار سایه جت آب ثبت می‌شود. کد به صورت خودکار نشانگر را شناسایی می‌کند و با شمارش تعداد پیکسل آن، می‌تواند ابعاد فیزیکی هر پیکسل را محاسبه کند. در مسیر دوم پردازش تصویر، عکس خام ستون جت (شکل ۳ بالا) دریافت می‌شود و در اولین مرحله، ستون جت شناسایی شده و مرز سایه‌های آن از تصاویر پس‌زمینه جدا می‌شود (شکل ۲ وسط). در گام نهایی منحنی اصلی ستون جت به صورت یک خط مشخص جدا می‌شود. به کمک این منحنی نهایی می‌توان پارامترهای مورد نیاز از

هیدرولیکی انژکتورها در شکل ۵ مقایسه شده است. مشابه عدد وبر، به دلیل بزرگتر بودن قطر هیدرولیکی انژکتور دایروی، عدد رینولدز آن در دبی جرمی یکسان، بزرگتر از انژکتورهای مستطیلی و دایروی است. بالاترین عدد رینولدز آزمایش شده برای انژکتورهای دایروی، مستطیلی و بیضوی به ترتیب برابر با ۱۸۵۵۳، ۱۶۹۸۰ و ۱۵۴۷۲ بوده است. با توجه به مرزهای رژیم جریان آرام، گذرا و آشفته که در شکل مشخص شده‌اند، دیده می‌شود که جت دایروی زودتر و جت مستطیلی دیرتر از بقیه جت‌ها وارد رژیم جریان آشفته شده است. همچنین همانند تغییرات عدد وبر، با افزایش دبی جرمی جریان، اختلاف بین عدد رینولدز سه جت نیز به شکل چشمگیری افزایش یافته است.

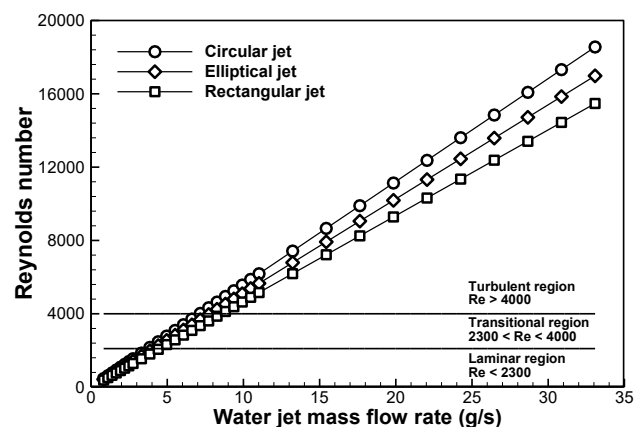
نیروی سطحی و نیروی اینرسی جت دو نیروی اصلی در تعیین رژیم جریان جت مایع می‌باشند. با توجه به اینکه عدد وبر نسبت نیروی اینرسی جت به نیروی سطحی را نشان می‌دهد، پارامتر مناسبی برای تعیین رژیم جریان جت است. به طور کلی برای تزریق جت مایع به درون محیط گازی پنج رژیم جریان تعریف می‌شود که عبارتند از: رژیم قطره چکان، رژیم ریلی، رژیم باد القایی اول، رژیم باد القایی دوم و رژیم اتمیزاسیون (لین و ریتز [۲۳]). این رژیم‌ها را می‌توان بر اساس عدد وبر جت و عدد وبر گاز دسته‌بندی کرد. معیارهای این دسته‌بندی در جدول ۱ آمده است.

وقتی جت مایع از یک نازل کشیده همچون مستطیلی یا بیضوی خارج می‌شود، پدیده تغییر محور مشاهده می‌شود. در این پدیده محورهای اصلی جت به صورت پیوسته در حین حرکت جت به سمت پایین جابه‌جا می‌شوند. برای مشاهده این پدیده باید از ستون جت در دو زاویه متفاوت عکس‌برداری شود. با توجه به اینکه نیروی سطحی تمایل دارد که با کم کردن مساحت سطح و رسیدن به شکلی دایروی به حداقل انرژی سطحی ممکن برسد، هندسه جت از یک وضعیت کشیده مستطیلی یا بیضوی به سمت یک هندسه با سطح مقطع



شکل ۴: تغییرات عدد وبر با دبی جرمی برای هر سه انژکتور

Fig. 4: Variations of Weber number with mass flow rate for all the three jets



شکل ۵: تغییرات عدد رینولدز با دبی جرمی برای هر سه انژکتور

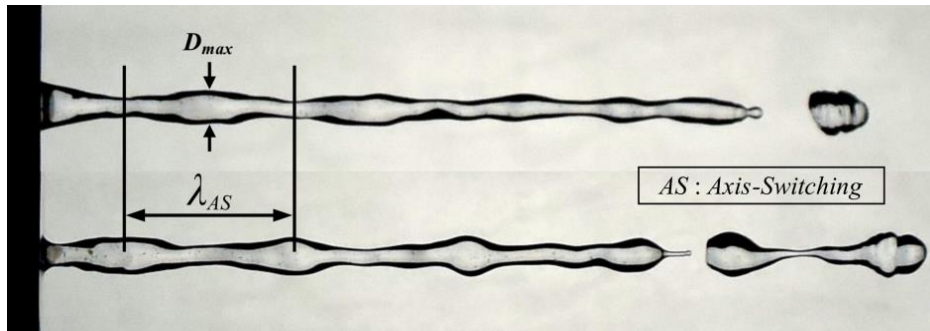
Fig. 5: Variations of Reynolds number with mass flow rate for all the three jets

که در این رابطه a نیم طول محور بزرگ بیضی و b نیم طول محور کوچک بیضی می‌باشد. با توجه به ابعاد داده شده در شکل ۲ طول معادل انژکتور بیضوی $2/70$ میلی‌متر به دست می‌آید که به قطر انژکتور دایروی نزدیک است. این در حالی است که برای انژکتور مستطیلی قطر معادل $2/36$ میلی‌متر می‌باشد که $16/6$ درصد کوچکتر از قطر انژکتور دایروی است. عدد رینولدز جت تزریقی برحسب قطر

جدول ۱: دسته‌بندی رژیم جریان جت براساس پارامترهای جت مایع و گاز

Table 1: Flow regimes classification based on liquid and gas parameters

اتمیزاسیون	باد القایی دوم	باد القایی اول	ریلی	قطره چکان
$We_L > 32,800$	$We_L < 32,800$	$We_L < 10,600$	$We_L > 8$	$We_L < 8$
$We_G > 40.3$	$13 < We_G < 40.3$	$0.4 < We_G < 13$	$We_G < 0.4$	$We_G < 0.01$



شکل ۶: پدیده تغییر محور در انژکتور بیضوی. بالا) نما از محور بزرگ، پایین) نما از محور کوچک

Fig. 6: Axis-switching phenomenon over elliptical jets. upper) major axis view, lower) minor view axis

جت، نیروهای آیرودینامیکی هوا و نیروی اینرسی جت ناچیز هستند. در این رژیم شکست ستون جت به خاطر تمایل نیروی سطحی برای کمینه کردن انرژی سطحی با به حداقل رساندن مساحت سطح جت روی می‌دهد.

در رژیم ریلی، طول شکست ستون جت با افزایش عدد وبر به صورت خطی افزایش می‌یابد تا به بیشینه خود در عدد وبر بحرانی برسد. مطابق شکل عدد وبر بحرانی برای جت دایروی $3/7$ به ثبت رسیده است. بعد از گذر از عدد وبر بحرانی، به دلیل زیاد شدن سرعت جت، نیروی آیرودینامیکی گاز به 10 درصد نیروی سطحی رسیده و اثرات آن باعث کاهش ناگهانی طول شکست جت می‌شود. در این رژیم که به باد القایی اول یا باد کمی شناخته می‌شود، اثرات آیرودینامیکی گاز باعث تقویت ناپایداری‌های جریان شده و در نتیجه طول شکست کاهش می‌یابد تا به کمترین مقدار خود برسد. چنان که در شکل ۷ مشاهده می‌شود عدد وبر $7/56$ متناظر با کمترین طول شکست و پایان رژیم باد القایی اول است. در این رژیم همچنان نیروی سطحی نیروی غالب است که رفتار کلی ستون جت را تعیین می‌کند. اگرچه در این رژیم همچنان امواج تشکیل شده بر روی سطح جت متقارن هستند، اما مشاهده می‌شود که تعداد آنها بسیار بیشتر شده است. در واقع، به دلیل اثرات آیرودینامیکی هوا، ناپایداری‌هایی که در رژیم ریلی به اندازه کافی رشد پیدا نمی‌کردند تا بر روی سطح جت ظاهر شوند، در رژیم باد القایی اول تقویت شده و کاملاً بر روی سطح جت بروز پیدا می‌کنند. از عدد وبر $7/56$ تا 25 طول شکست جت تغییرات بسیار کمی دارد و می‌توان گفت که طول شکست جت ثابت باقی می‌ماند. این رفتار در واقع ناشی از این واقعیت است که در این ناحیه، توازنی نسبی بین نیروهای اینرسی، سطحی و آیرودینامیکی

دایروی سوق پیدا می‌کند. در طی این تغییر یک سرعت عرضی ایجاد می‌شود که تمایل به ادامه حرکت دارد به گونه‌ای که پس از رسیدن به سطح مقطع دایروی، تغییر شکل ادامه پیدا می‌کند و با رسیدن دو موج سرعت از طرفین و برخورد با یکدیگر، این بار در جهت مخالف قطر جت رشد می‌کند. به این صورت، با حرکت جت به سمت پایین، محورهای بزرگ و کوچک آن جابه‌جا می‌شود. شکل ۶ پدیده تغییر محور تشکیل شده از یک انژکتور بیضوی را نشان می‌دهد. مطابق شکل طول موج و دامنه این پدیده تعریف می‌شود.

۳-۱- تصاویر آشکارسازی جت

تصاویر سایه‌نگاری به خوبی امکان بررسی شکل ظاهری ستون جت و تغییرات آن با پارامترهای مختلف را فراهم می‌کند که می‌تواند کمک بسزایی در شناخت رفتار جت باشد. چنان که اشاره شد، در این پژوهش پارامترهای متغیر تنها هندسه انژکتور و سرعت جت می‌باشند. در شکل ۷ تغییرات ستون جت دایروی به عنوان هندسه مرجع با افزایش عدد وبر آمده است. با توجه به اینکه در تمامی آزمایش‌ها فاصله دوربین از جت ثابت نگه داشته شده است، ابعاد تصاویر مختلف در شکل ۷ قابل قیاس با هم هستند و نشانگر دایروی که در تصویر سمت چپ نشان داده شده است برای همه تصاویر یکسان است. همانگونه که از شکل ۷ مشخص است، سطح ستون جت دایروی در سرعت‌های پایین که متناظر با رژیم ریلی است، به صورت کاملاً صاف و بدون هیچگونه نآرامی می‌باشد. با پایین آمدن جت، ناپایداری‌های ذاتی جریان به صورت موج‌های متقارن رشد پیدا کرده و نهایتاً منجر به شکست ستون جت می‌شود. در این رژیم نیروی سطحی نیروی غالب بر جت بوده و با توجه به سرعت پایین



شکل ۷: تغییرات ستون جت دایروی با افزایش عدد وبر

Fig. 7: Variations of circular liquid column with increase of Weber number

با افزایش بیشتر عدد وبر، اینرسی جت بسیار بیشتر شده و جریان جت آشفته می‌شود. در این رژیم نیروی آیرودینامیکی گاز با نیروی سطحی هم مرتبه شده که به همراه اثرات نیروی اینرسی موجب بروز ناآرامی‌ها و نوسانات فراوانی بر روی سطح جت می‌شوند. همچنین

برقرار می‌شود که با خنثی کردن اثرات همدیگر، طول شکست جت بدون تغییر باقی می‌ماند. با افزایش بیشتر سرعت جت و شدت گرفتن سهم نیروی اینرسی، اثرات نیروی سطحی کاهش پیدا می‌کند و طول شکست جت افزایش می‌یابد.

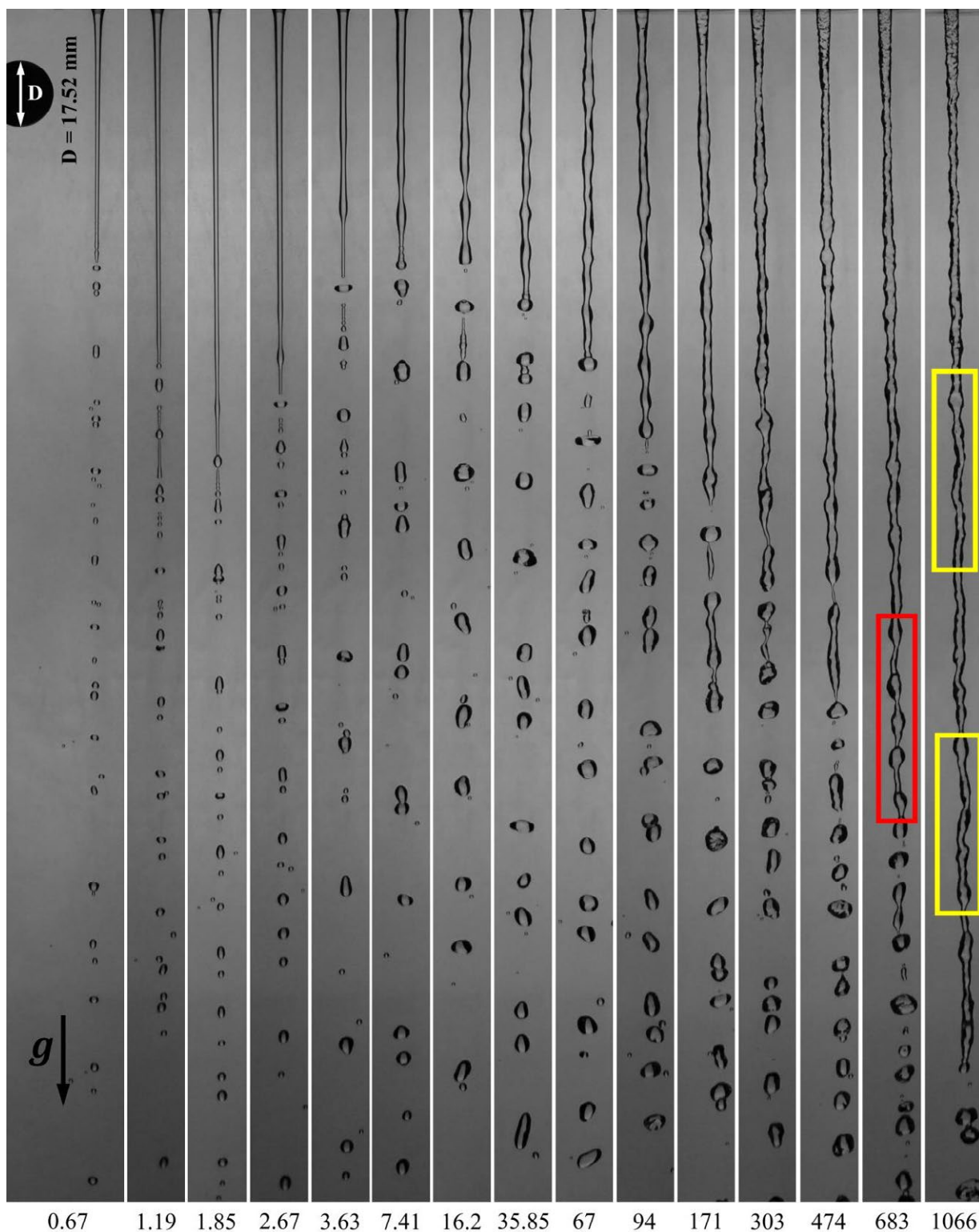
می‌یابد. افزایش طول شکست جت از عدد وبر $35/85$ تا آخرین عدد وبر آزمایش شده در تصاویر مشهود است. در این ناحیه که رژیم باد القایی دوم نامیده می‌شود، جریان جت آشفته شده و شکست جت ناشی از رشد ناپایداری‌های با بسامد بالا و دامنه کم است. ساختار غیرکروی و ناهمگون قطرات جدا شده از ستون جت نیز نشان می‌دهد که نیروی سطحی سهم زیادی در شکست جت ندارد.

تأثیرات افزایش اینرسی بر روی پدیده تغییر محور نیز قابل توجه است. در اعداد وبر کمتر که پدیده تغییر محور رخ داده است، تعداد دفعات تغییر محور بیشتر است و تا شش بار نیز قابل شمارش است، در حالی که در اعداد وبر بالا به سختی تا دو تا سه بار می‌توان تغییر محور را مشاهده کرد. در حقیقت، به دلیل افزایش چشمگیر آشفتگی جریان و تشکیل ساختارهای مختلف بر روی سطح جت، هندسه جت به قدری تغییر پیدا می‌کند که امکان تشخیص تغییر محور از جایی به بعد میسر نیست. همچنین، چنان که از شکل پیداست، با بیشتر شدن سرعت جت، طول موج تغییر محور نیز افزایش یافته است. افزایش طول موج تغییر محور با افزایش سرعت جت به این خاطر است که هرچه نسبت نیروی اینرسی نسبت به نیروی سطحی بیشتر می‌شود، توانایی نیروی سطحی برای تغییر شکل هندسه جت از بیضوی به دایروی کاهش می‌یابد و این فرآیند را در مدت زمان بیشتری تکمیل می‌کند. بنابراین جت فرصت کافی برای پیشروی به دست می‌آورد که نهایتاً منجر به کشیده‌تر شدن طول موج تغییر محور می‌شود. در اعداد وبر بالا، اتصال زنجیره‌ای در آستانه شکست ستون جت نیز مشاهده می‌شود. این رفتار در عدد وبر 683 با کادر قرمز رنگ در شکل ۸ مشخص شده است. به نظر می‌رسد که علت بروز این رفتار رشد همزمان و یکسان چند ناپایداری بر روی سطح جت می‌باشد که سرانجام منجر به شکست ستون جت می‌شوند. همچنین، در سرعت‌های خیلی بالا، موج‌های عرضی بر روی سطح جت ظاهر می‌شوند. آغاز شکل‌گیری این امواج در شکل ۸ با کادرهای زرد رنگ مشخص شده است. تشکیل امواج عرضی به خاطر زیاد شدن اثرات آیرودینامیکی هوا و افزایش سرعت عرضی جت به واسطه آشفتگی بالای جریان می‌باشد.

تصاویر آشکارسازی تزریق جت مستطیلی در اعداد وبر مختلف در شکل ۹ آمده است. همانند شکل‌های قبل فاصله دوربین در تمامی تصاویر ثابت است و مقیاس دایروی مشخص شده در شکل اول برای

نیروی اینرسی باعث افزایش پایداری طول ستون جت شده و طول شکست افزایش می‌یابد. تمامی این رفتارها را می‌توان در شکل ۷ و برای اعداد وبر بالاتر از $19/4$ مشاهده نمود. چنان که مشاهده می‌شود ضمن افزایش طول ستون جت، نوسانات با دامنه کوتاه و بسامد بالا بر سطح جت ظاهر شده است.

در شکل ۸ تصاویر سایه‌نگاری جت آب بیضوی در اعداد وبر مختلف نمایش داده شده است. همانند شکل ۷، نشانگر دایروی عکس‌ها در تصویر مربوط به پایین‌ترین عدد وبر حفظ شده است که با توجه به ثابت بودن فاصله دوربین از جت، به عنوان مقیاس برای تمامی تصاویر به کار می‌رود. در رژیم ریلی، رفتار جت مشابه با جت دایروی است و هندسه جت تحت تأثیر نیروی سطحی خیلی سریع از بیضوی به دایروی تغییر شکل می‌دهد. همچنین در این رژیم سطح جت کاملاً صاف و آرام پایین می‌آید و نهایتاً ناپایداری رشد یافته بر سطح جت به صورت متقارن، باعث شکست ستون جت می‌شود. با افزایش سرعت جت و متعاقباً عدد وبر، طول شکست جت افزایش می‌یابد و در $We = 1/85$ به مقدار بحرانی خود می‌رسد. نتایج به دست آمده مطابق با نتایج کاسیاپ و همکاران [۱۵] می‌باشد که عدد بحرانی جت‌های بیضوی را کوچکتر از جت دایروی گزارش کرده‌اند. با گذر از سرعت بحرانی، جت وارد رژیم باد القایی اول می‌شود که در آن اثرات آیرودینامیکی باعث تقویت ناپایداری‌های ذاتی جریان شده و شکست ستون جت زودتر انجام می‌شود. افزایش دامنه و تعداد ناپایداری‌ها قابل مشاهده بر روی ستون جت در این رژیم واضح است. روند کاهش طول شکست جت تا $We = 16/2$ ادامه پیدا می‌کند که در این عدد وبر، طول شکست جت به کمترین مقدار خود می‌رسد. پدیده تغییر محور برای اولین بار در رژیم باد القایی اول قابل مشاهده است. اگرچه عدد وبر متناظر با آغاز این پدیده به ضریب منظری هندسه مورد استفاده بستگی دارد، اما برای آنژکتور بیضوی موجود، این پدیده اولین بار در عدد وبر $3/63$ روی می‌دهد. در تصویر مربوط به عدد وبر $7/41$ در شکل ۸، تغییر محور به طور واضح قابل رؤیت است که نشان می‌دهد باید در سرعت‌های پایین‌تر رخ داده باشد. با افزایش بیشتر عدد وبر و سرعت جت، ناپایداری‌های روی سطح جت بیشتر شده و تقارنی که در سرعت‌های پایین وجود داشت نیز کاملاً از بین می‌رود. به واسطه افزایش نیروی اینرسی جت و غلبه آن بر نیروی سطحی و اثرات آیرودینامیکی، طول شکست جت افزایش



شکل ۸: تغییرات جت آب بیضوی با عدد وبر

Fig. 8: Variations of elliptical water jet with Weber number

مستطیلی جت را از بین برده و آن را دایروی می‌کند. خصوصیات ظاهری جت مستطیلی در رژیم ریلی مشابه جت‌های دایروی و بیضوی است. جت مستطیلی در عدد وبر $3/1$ به مقدار بحرانی خود

تمامی تصاویر قابل استفاده است. باید اشاره شود که آزمایش‌ها در دبی‌های جرمی یکسان با جت بیضوی و دایروی انجام شده است. همانند جت بیضوی، نیروی سطحی در رژیم ریلی سریعاً هندسه

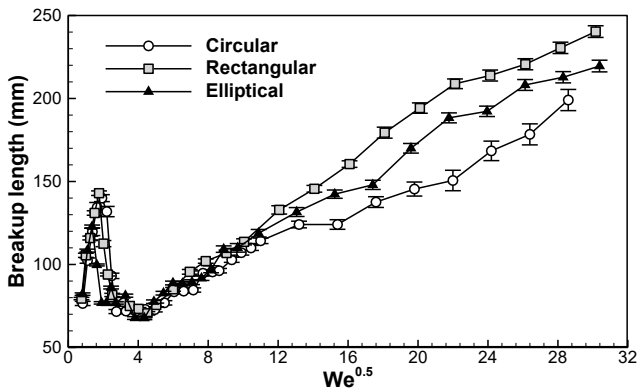


شکل ۹: تغییرات جت آب مستطیلی با عدد وبر

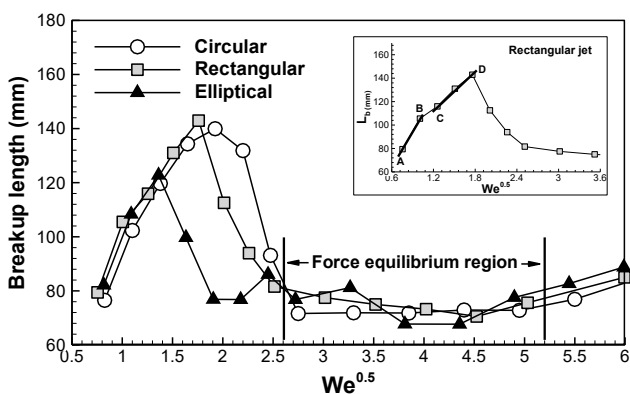
Fig. 9: Variations of rectangular water jet with Weber number

بزرگ می‌شود و در نتیجه اثرات آیرودینامیکی سریعتر تقویت شده و رژیم باد القایی اول زودتر آغاز می‌شود. در گستره بین اعداد وبر $3/1$ تا $23/99$ ، جت بیضوی در رژیم باد القایی اول قرار دارد. تقویت ناپایداری‌های جریان به دلیل اثرات

می‌رسد که در مقام مقایسه می‌توان نتیجه گرفت که جت مستطیلی زودتر از جت دایروی با عدد وبر بحرانی $3/7$ و دیرتر از جت بیضوی با عدد وبر بحرانی $1/85$ به مقدار بحرانی خود می‌رسد. به نظر می‌رسد که به دلیل بزرگتر بودن قطر معادل جت بیضوی، عدد وبر گاز زودتر



شکل ۱۰: نمودار پایداری جت‌های آب دایروی، مستطیلی و بیضوی
Fig. 10: Stability curve of circular, rectangular and elliptical water jets



شکل ۱۱: نموداری پایداری جت‌های مختلف در اعداد وبر پایین

Fig. 11: Stability curve of all jets at low Weber numbers

بزرگنمایی شده است.

مطابق شکل ۱۰، یک رفتار مشابه در نمودار پایداری هر سه جت دیده می‌شود که با نتایج گزارش شده در مطالعات پیشین همخوانی کامل دارد [۱۳ و ۱۴ و ۲۳]. مطابق شکل، افزایش خطی طول شکست برای هر سه جت در رژیم ریلی دیده می‌شود که نهایتاً پس از رسیدن به یک نقطه بیشینه در عدد وبر بحرانی، طول شکست ناگهان کاهش پیدا می‌کند. پس از گذر از این مقدار بحرانی، جت مایع وارد رژیم باد القایی اول شده است که در این رژیم اثرات آیرودینامیکی با تقویت ناپایداری‌های جریان موجب تسریع شکست ستون جت مایع می‌شوند. روند کاهشی طول شکست ادامه پیدا می‌کند تا وقتی که سرعت جت به حدی افزایش پیدا می‌کند که نیروی اینرسی با نیروی سطحی هم مرتبه شده و با افزایش بیشتر سرعت بزرگتر می‌شود. در این ناحیه که رژیم باد القایی دوم نام دارد، طول شکست جت به صورت مدام با افزایش عدد وبر افزایش می‌یابد تا وقتی که رژیم اتمیزاسیون آغاز

آیرودینامیکی موجب کاهش طول شکست در این رژیم شده به گونه‌ای که در عدد وبر ۲۳/۹۹، طول شکست به کمترین مقدار خود می‌رسد. همانند جت بیضوی، پدیده تغییر محور اولین بار در این رژیم مشاهده می‌شود. تغییر محور در عدد وبر ۶/۳۲ به راحتی بر روی سطح جت دیده می‌شود و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت این پدیده در اعداد وبر پایین تر رخ داده است. در تصاویر به دست آمده از تست‌های انجام شده در عدد وبر ۵/۰۴، تغییر محور با دامنه‌های بسیار پایین قابل رؤیت است که می‌توان آن رو به عنوان عدد وبر متناظر با آغاز این پدیده در نظر گرفت. در عدد وبر ۲۳/۹۹ که رژیم باد القایی دوم آغاز می‌شود، پدیده تغییر محور به صورت واضح دیده می‌شود و تعداد دفعات وقوع آن نیز قابل شمارش است.

با افزایش نیروی اینرسی جت و متعاقباً تشدید شدن اثرات آیرودینامیکی گاز، مشخصه‌های رفتاری و ظاهری ستون جت مستطیلی متشابه با جت‌های دایروی و بیضوی دستخوش تغییر می‌شود. افزایش ناپایداری‌های روی سطح جت، بر هم خوردن تقارن هندسی جت، افزایش طول شکست جت و افزایش طول موج و کاهش تعداد دفعات تکرار پدیده تغییر محور ویژگی‌هایی است که در این رژیم دیده می‌شود. همچنین اتصال زنجیره‌ای ستون جت در آستانه شکست جت نیز دیده می‌شود که با کادر قرمز رنگ در شکل ۹ مشخص شده است.

در بخش‌های بعدی ویژگی‌های این جت‌ها به صورت کمی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۳- طول شکست ستون جت

طول شکست جت‌های دایروی، مستطیلی و بیضوی برای اعداد وبر مختلف اندازه‌گیری شده و براساس آن نمودار پایداری این سه جت به دست آمده که در شکل ۱۰ رسم شده است. اولین مکان طولی که در آن که بخشی از جت آب از ستون اصلی جدا می‌شود به عنوان طول شکست جت در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه مقادیر گزارش شده برای طول شکست در واقع مقادیر میانگین می‌باشند، ممکن است اختلافاتی با تصاویر ارائه شده در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ که وضعیت لحظه‌ای جت را نشان می‌دهد وجود داشته باشد. همچنین برای بررسی دقیق‌تر رفتار جت در سرعت‌های خیلی پایین، تغییرات طول شکست برای اعداد وبر پایین در شکل ۱۱ به صورت جداگانه

بروز پدیده تغییر محور مرتبط دانست. با توجه به اینکه در سرعت‌های پایین، تغییر محور نقش ناپایدارکننده دارد، ظهور این پدیده بر روی ستون جت موجب کاهش طول شکست می‌شود. چنان که در بخش قبل اشاره شد، تغییر محور برای جت‌های مستطیلی و بیضوی به ترتیب در اعداد وبر $5/04$ و $3/63$ رخ می‌دهد و از این روست که جت بیضوی زودتر به نقطه بحرانی می‌رسد. باید توجه داشت که این رفتار مشاهده شده از جت مستطیلی تنها محدود به انژکتور با ضریب منظری ۲ می‌باشد و برای ضرایب منظری بالاتر، این رفتار لزوماً تکرار نمی‌شود.

بین رژیم‌های باد القایی اول و دوم ناحیه کوچکی وجود دارد که در آن تغییرات طول شکست ستون جت برای هر سه هندسه ناچیز است. در این ناحیه، یک توازن نسبی بین نیروی اینرسی که تمایل به افزایش طول شکست جت و نیروهای آیرودینامیکی و سطحی که تمایل به کاهش طول شکست جت دارند، ایجاد می‌شود که موجب می‌شود طول شکست جت تغییر نکند. چنان که در شکل ۱۱ مشخص شده، این ناحیه بین $\sqrt{We} = 2/6$ تا $\sqrt{We} = 5/2$ قرار گرفته است. یکی از رفتارهای ویژه جت مستطیلی تغییر ناگهانی شیب نمودار پایداری آن در رژیم ریلی است. برای بررسی دقیق‌تر این تغییر شیب، نمودار پایداری جت مستطیلی به صورت زیر مجموعه در شکل ۱۱ رسم شده که در آن شیب اولیه نمودار پایداری با خط A-B و شیب ثانویه آن با خط C-D مشخص شده است. این تغییر شیب که در نزدیکی عدد وبر $1/5$ روی می‌دهد در مرجع [۱۳] نیز گزارش شده و علت آن به آغاز وقوع پدیده تغییر محور مربوط شده است. در هر حال مشاهده تغییر محور در این عدد وبر به هیچ وجه ممکن نیست و در اعداد وبر بالاتر که دامنه آن افزایش می‌یابد، قابل رؤیت می‌شود.

۳-۳- پدیده تغییر محور

مشخصه‌های پدیده تغییر محور یعنی طول موج و دامنه برای هر دو جت‌های بیضوی و مستطیلی مورد مطالعه قرار گرفته است. در اعداد وبر پایین هندسه اولیه جت‌های بیضوی و مستطیلی سریعاً میرا شده و به شکل دایروی تبدیل می‌شود، بنابراین پدیده تغییر محور مشاهده نمی‌شود. با بیشتر شدن سرعت جریان جت و تقویت شدن نیروی اینرسی، جریان توانایی لازم برای مقابله با نیروی سطحی را پیدا کرده و پدیده تغییر محور رخ می‌دهد. روند تشکیل و تغییرات این

شود. در تمامی آزمایش‌ها انجام شده در این مطالعه، سرعت جت به رژیم باد القایی دوم محدود بوده است.

در ابتدای رژیم باد القایی، تفاوت ناچیزی بین طول شکست سه جت دیده می‌شود. همچنین در بازه کوچکی بین رژیم باد القایی اول و دوم، طول شکست تقریباً ثابت است و تغییرات کمی دارد. به نظر می‌رسد که در این ناحیه، یک توازن نسبی بین نیروی اینرسی که تمایل به افزایش طول شکست و نیروهای آیرودینامیکی و سطحی که تمایل به شکست سریعتر ستون جت را دارند، ایجاد می‌شود که این توازن باعث ثابت ماندن طول شکست در بازه بین $\sqrt{We} \approx 2/5$ تا $\sqrt{We} \approx 5$ می‌شود. با افزایش بیشتر سرعت و غالب شدن نیروی اینرسی، طول شکست روند افزایشی پیدا می‌کند. چنان که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، در رژیم باد القایی دوم طول شکست جت دایروی کمتر از دو جت دیگر است. کمتر بودن طول شکست جت دایروی نسبت به جت بیضوی در کار کاسیپ و همکاران [۱۵] نیز گزارش شده است. همچنین نمودار پایداری نشان می‌دهد که جت مستطیلی دارای بیشترین پایداری نسبت به دو جت دیگر است. به نظر می‌رسد که برخلاف سرعت‌های پایین، در سرعت‌های بالا پدیده تغییر محور نقش پایدارکننده دارد. چنان که در بخش بعدی نشان داده می‌شود، بزرگتر بودن طول موج تغییر محور برای جت مستطیلی نسبت به جت بیضوی می‌تواند مؤید همین نکته باشد.

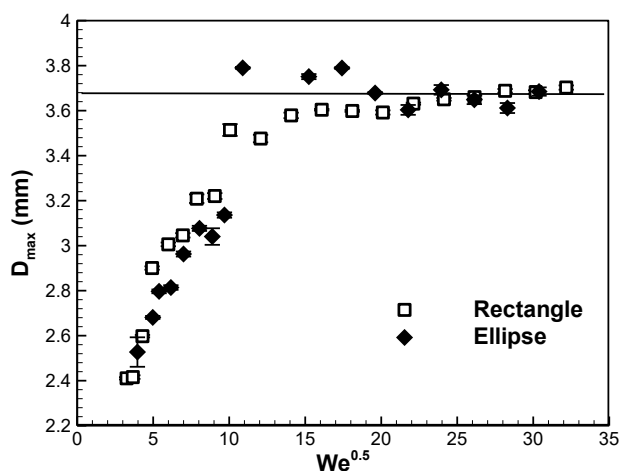
به منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات رفتار جت‌ها در سرعت‌های پایین که رژیم‌های ریلی و باد القایی اول روی می‌دهند، نمودار پایداری به صورت بزرگنمایی شده و تا $\sqrt{We} = 6$ در شکل ۱۱ رسم شده است. به کمک این شکل به خوبی می‌توان مشاهده کرد که در ابتدای رژیم ریلی رفتار جت‌های بیضوی و مستطیلی کاملاً مشابه با جت دایروی است و نمودار پایداری برای هر سه تقریباً یکسان است. از آنجا که در رژیم ریلی نیروی سطحی کاملاً غالب است، جت‌های بیضوی و مستطیلی خیلی زود به شکل دایروی تغییر شکل می‌دهند تا به کمترین سطح انرژی برسند و به همین دلیل رفتاری مشابه جت دایروی از خود نشان می‌دهند. جت بیضوی زودتر از دو جت دیگر و در $We_{crit} = 1/85$ به مقدار بحرانی خود می‌رسد. این در حالی است که جت مستطیلی در عدد وبر $3/1$ به مقدار بحرانی خود می‌رسد که نشان می‌دهد در رژیم ریلی جت مستطیلی رفتاری مطابق با جت دایروی دارد. تفاوت رفتار جت‌های مستطیلی و بیضوی را می‌توان به

$$\lambda_{as} = 3.13\sqrt{We} - 3.83 \quad (3)$$

همچنین نتایج مربوط به دامنه بیشینه تغییر محور در شکل ۱۳ ارائه شده است. مطابق شکل، رفتار دامنه بیشینه برای هر دو انژکتور تقریباً یکسان است و اختلاف کمی بین آنها دیده می‌شود. برای هر دو جت، دامنه بیشینه تغییر محور با افزایش عدد وبر ابتدا افزایش می‌یابد و سپس به مقدار ثابتی میل می‌کند. برخلاف جت مستطیلی که به صورت یکنواخت افزایش می‌یابد، در جت بیضوی یک افزایش ناگهانی دیده می‌شود که دوباره میرا شده و به مقدار حدی ثابت میل می‌کند. باید اشاره شود که اندازه‌گیری دامنه بیشینه در بازه محدودی از سرعت انجام می‌شود چرا که با افزایش سرعت و شکل‌گیری ناآرامی‌های مختلف بر روی سطح ستون جت، هندسه جت به شدت دستخوش تغییرات شده و امکان تعیین کردن دامنه موج دیگر مقدور نیست. همچنین در سرعت‌های بالا، جت دایروی دارای کمترین پایداری و کوتاه‌ترین طول شکست می‌باشد که نشان می‌دهد پدیده تغییر دارای رفتار ناپایدار کننده در سرعت‌های پایین و پایدارکننده در سرعت‌های بالاست. طول موج و دامنه تغییر موج نیز به عنوان ویژگی مشترک جت‌های بیضوی و مستطیلی به طور کامل بررسی و نشان داده شد که طول موج تغییر محور جت مستطیلی از جت بیضوی بلندتر است.

۴- نتیجه‌گیری

ناپایداری جت‌های آب مستطیلی و بیضوی با ضریب منظری ۲ به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته و رفتار جریان جت آن‌ها

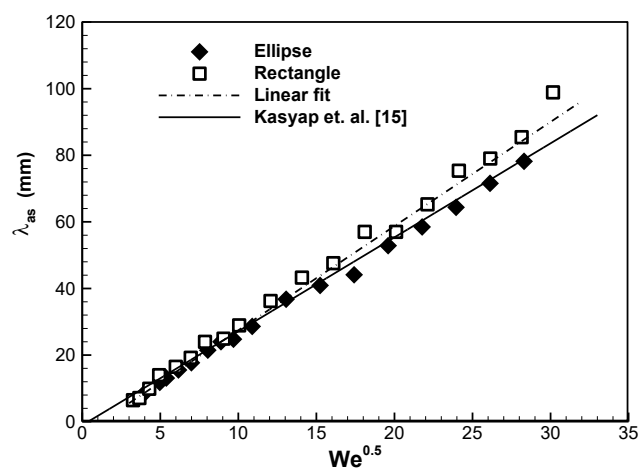


شکل ۱۳: تغییرات دامنه تغییر محورها مجذور عدد وبر

Fig. 13: Variations of axis-switching amplitude with square root of Weber number

پدیده به خوبی به کمک تصاویر آشکارسازی ارائه شده در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است. با توجه به اینکه عکس‌برداری‌ها نسبت به محورهای بزرگ هر دو جت بیضوی و مستطیلی گرفته شده است، طول موج تغییر محور به عنوان فاصله بین دو نقطه کمینه ستون جت و دامنه تغییر محور به عنوان قطر بیشینه جت در نظر گرفته شده است (شکل ۶).

نتایج به دست آمده از طول موج تغییر محور در شکل ۱۲ و برای هر دو جت بیضوی و مستطیلی آمده است. مطابق شکل عدد وبر متناظر با شروع پدیده تغییر محور تقریباً برای هر دو جت یکسان است. چنان که مشاهده می‌شود، طول موج تغییر محور به صورت خطی با مجذور عدد وبر افزایش پیدا می‌کند که این رفتار خطی در مراجع گوناگون نیز گزارش شده است [۱۵ و ۱۸]. در شکل ۱۲ نمودار خطی به دست آمده از پژوهش تجربی کاسیپ و همکاران [۱۵] نیز آمده است. این پژوهش تنها به بررسی انژکتورهای بیضوی پرداخته است و چنان که در شکل ۱۲ مشهود است، نقاط به دست آمده برای انژکتور بیضوی پژوهش حاضر کاملاً با نمودار مرجع [۱۵] تطابق دارد. از مقایسه دو جت بیضوی و مستطیلی می‌توان دریافت که در اعداد وبر پایین‌تر از ۱۲، طول موج تغییر محور برای هر دو جت یکسان است و تفاوت محسوسی ندارد. اما برای اعداد وبر بالاتر، جت مستطیلی طول موج بلندتری را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که اختلاف طول موج تغییر برای هر دو جت ناچیز است، از برازش نتایج هر دو جت، رابطه (۳) برای تخمین طول موج تغییر محور، λ_{as} ، به دست آمده است.



شکل ۱۲: تغییرات طول موج تغییر محور با مجذور عدد وبر

Fig. 12: Variations of axis-switching wavelength with square root of Weber number

گاز	G
شکست	b
بیشینه	max

مراجع

- [1] F. Savart, Mémoire sur la constitution des veines liquides lancées par des orifices circulaires en mince paroi, Ann. Chim. Phys, 53(337) (1833) 1833.
- [2] J. Plateau, Statique experimentale et theorique des liquids soumis aux seules forces moleculaires. Cited by Lord Rayleigh, Theory of Sound, Vol. II, (1945).
- [3] G. Magnus, Hydraulische untersuchungen, Annalen der Physik, 171(5) (1855) 1-59.
- [4] L. Rayleigh, On the capillary phenomena of jets, in: Proc. R. Soc. London, 1879, pp. 71-97.
- [5] L. Rayleigh, On the tension of recently formed liquid surfaces, Proceedings of the Royal Society of London, 47 (1889) 281-287.
- [6] D. Bogoy, Drop formation in a circular liquid jet, Annual Review of Fluid Mechanics, 11(1) (1979) 207-228.
- [7] R.D. Reitz, F. Bracco, Mechanisms of breakup of round liquid jets, Encyclopedia of fluid mechanics, 3 (1986) 233-249.
- [8] C. Weber, Zum zerfall eines flüssigkeitsstrahles, ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 11(2) (1931) 136-154.
- [9] A.M. Sterling, C. Sleicher, The instability of capillary jets, Journal of Fluid Mechanics, 68(3) (1975) 477-495.
- [10] G. Taylor, Generation of ripples by wind blowing over a viscous fluid. Reprinted in The Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor, Vol. 3, in, Cambridge Univ. Press, London, 1963.
- [11] M. Birouk, N. Lekic, Liquid jet breakup in quiescent atmosphere: A review, Atomization and Sprays, 19(6) (2009).
- [12] E. Gutmark, F. Grinstein, Flow control with noncircular jets, Annual review of fluid mechanics, 31(1) (1999) 239-272.
- [13] F. Wang, T. Fang, Liquid jet breakup for non-circular orifices under low pressures, International Journal of Multiphase Flow, 72 (2015) 248-262.
- [14] T. Kasyap, D. Sivakumar, B. Raghunandan, Breakup

با هم مقایسه شده است. در کنار انژکتورهای بیضوی و مستطیلی، یک انژکتور دایروی با مساحت مقطع برابر نیز به عنوان هندسه معیار آزمایش شده است. برای آشکارسازی جت از روش سایه‌نگاری استفاده شده و عکس‌های لحظه‌ای جریان به کمک دوربین سرعت بالا ثبت شده است. آزمایش‌ها برای دبی‌های جرمی مختلف متناظر با اعداد وبر بین ۰/۵ تا ۱۱۰۰ انجام شده و به این ترتیب ویژگی‌های هر جت در رژیم‌های ریلی، باد القایی اول و باد القایی دوم مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از تصاویر آشکارسازی، رفتار فیزیکی هر سه جت در سرعت‌های برابر بررسی و با هم مقایسه شده است. نتایج تحلیل پایداری جت‌ها نشان داده که در سرعت‌های پایین، جت بیضوی دارای پایداری کمتری نسبت به جت‌های دیگر است در حالی که جت مستطیلی خصوصیات پایداری مشابه با جت دایروی از خود بروز می‌دهد. بر مبنای نتایج به دست آمده از هر دو جت، رابطه‌ای تجربی برای تخمین طول موج تغییر محور ارائه شده است. همچنین نشان داده شده که تغییرات دامنه بیشینه تغییر محور برای هر دو جت بیضوی و مستطیلی تقریباً یکسان بوده و بعد از یک افزایش اولیه، به مقدار ثابتی میل می‌کند.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

a	نیم طول محور بزرگ بیضی، m
b	نیم طول محور کوچک بیضی، m
D	قطر، m
g	شتاب گرانش، m/s^2
P	محیط، m
We	عدد وبر

علائم یونانی

ρ	چگالی، kg/m^3
σ	تنش سطحی، N/m
λ	طول موج m

زیرنویس

as	تغییر محور
L	مایع

- circular orifices, *Experiments in fluids*, 55(2) (2014) 1666.
- [20] K. Rajesh, R. Sakthikumar, D. Sivakumar, Interfacial oscillation of liquid jets discharging from non-circular orifices, *International Journal of Multiphase Flow*, 87 (2016) 1-8.
- [21] A. Konkachbaev, N. Morley, K. Gulec, T. Sketchley, Stability and contraction of a rectangular liquid metal jet in a vacuum environment, *Fusion engineering and design*, 51 (2000) 1109-1114.
- [22] E.-S.R. Negeed, S. Hidaka, M. Kohno, Y. Takata, Experimental and analytical investigation of liquid sheet breakup characteristics, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 32(1) (2011) 95-106.
- [23] S. Lin, R. Reitz, Drop and spray formation from a liquid jet, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 30(1) (1998) 85-105.
- of liquid jets emanating from elliptical orifices at low flow conditions, *Atomization and Sprays*, 18(7) (2008).
- [15] T. Kasyap, D. Sivakumar, B. Raghunandan, Flow and breakup characteristics of elliptical liquid jets, *International journal of multiphase flow*, 35(1) (2009) 8-19.
- [16] G. Amini, A. Dolatabadi, Axis-switching and breakup of low-speed elliptic liquid jets, *International Journal of Multiphase Flow*, 42 (2012) 96-103.
- [17] S. Gu, L. Wang, D.L. Hung, Instability evolution of the viscous elliptic liquid jet in the Rayleigh regime, *Physical Review E*, 95(6) (2017) 063112.
- [18] M.R. Morad, M.M. Nasiri, Numerical Simulation of the Liquid Jet Breakup for Elliptical Orifices with Different Aspect Ratios, (2015).
- [19] P. Sharma, T. Fang, Breakup of liquid jets from non-

