

مطالعه تجربی مشخصه‌های شکست جت‌های آب با مقاطع بیضوی، مستطیلی و دایروی *

امین جابری^(۱) مهران تاج‌فر^(۲) آرمین شیدانی^(۳)

چکیده در این پژوهش ناپایداری جت‌های آب بیضوی، مستطیلی و دایروی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. از روش سایه‌نگاری برای ثبت لحظه‌ای ستون جت استفاده شد. پارامترهای جت همچون طول شکست و طول موج تغییر محور به صورت کمی بررسی شده‌اند. نتایج پژوهش نشان داد که به دلیل مشخصه‌های مشترک جت‌های مستطیلی و بیضوی، طول شکست جت بیضوی با جت مستطیلی در رژیم باد القایی دوم تقریباً یکسان است. در مقایسه با جت دایروی، جت‌های بیضوی و مستطیلی زودتر تحت تأثیر اثرات آیرودینامیکی قرار می‌گیرند و بنابراین زودتر وارد رژیم جریان باد القایی اول می‌شوند. همچنین نشان داده شد که طول موج پدیده تغییر محور در اعداد وبر پایین به هندسه جت وابسته نیست و برای جت‌های مستطیلی و بیضوی یکسان است. مشاهده شد که در اعداد وبر بالا، طول موج تغییر محور جت مستطیلی بزرگ‌تر از جت بیضوی می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده رابطه‌ای نیمه تجربی برای تخمین طول موج تغییر محور پیشنهاد داده شد.

واژه‌های کلیدی شکست جت آب، پدیده تغییر محور، جت بیضوی، جت مستطیلی، جریان‌های دوفازی.

Experimental Investigation of Breakup Characteristics of Elliptical, Rectangular and Circular Water Jets

A. Jaberi M. Tadjfar A. Sheidani

Abstract In this study, the instabilities of elliptical, rectangular and circular water jets were experimentally investigated. Shadowgraph technique was employed to capture the jet column status instantaneously. Jet parameters such as disintegration length and axis switching wavelength were quantitatively studied. The results showed that due to the similar characteristics of rectangular and elliptical jets, their breakup length in the second wind-induced regime is nearly equal, while the breakup length of circular jet is perceptibly shorter. Both rectangular and elliptical jets are affected by aerodynamic forces sooner and thus enter the first wind induced regime at lower velocities. Furthermore, it was revealed that the axis switching wavelength is not dependent upon the jet geometry at low Weber numbers and remains equal for both elliptical and rectangular jets. However, at high Weber numbers, the axis switching wavelength of rectangular jet become larger than the elliptical one. Based on the obtained results, a semi-empirical relation was proposed to predict the axis switching wavelength of rectangular and elliptical jets.

Key Words Water jet breakup; Axis switching phenomenon; Elliptical jet; Rectangular jet; Multiphase flows.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۸/۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۳/۲۱ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v30i1.68226

(۱) نویسنده مسئول: دانشجوی دکترا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هوافضا. ajaberi@aut.ac.ir

(۲) دانشیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هوافضا.

(۳) کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هوافضا.

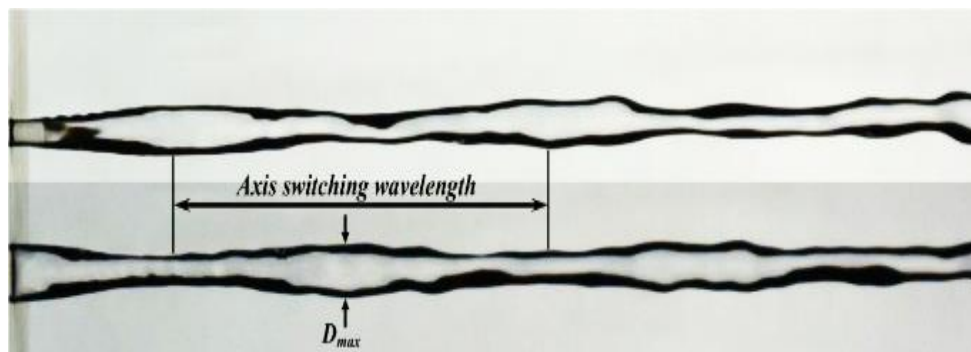
مقدمه

نشان داد که چگالی گاز محیط می‌تواند اثرات قابل توجهی بر روی شکست جت مایع داشته باشد. در تمامی مطالعات بالا تنها جت‌های دایروی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این مورد بوگی [7]، ریتز [8] و لین و ریتز [9] گزارش‌های کاملی در مورد شکست جت مایع دایروی ارائه داده‌اند. اما همان‌طور که در مقاله مروری بیروک و لیکیک [10] تأکید شده‌است، هندسه نازل نقشی کلیدی در مشخصه‌های شکست جت مایع بازی می‌کند.

از میان تمامی پارامترهای هندسی یک نازل، هندسه نازل خروجی دارای بالاترین اهمیت است. همانند مطالعاتی که در بالا اشاره شد، در بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده جت‌های دایروی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و جت‌های غیردایروی کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. جت‌های غیردایروی باعث افزایش ناپایداری جت مایع می‌شوند و فرایند شکست را تسریع می‌بخشند. از دیدگاه احتراقی، جت‌های غیردایروی می‌توانند باعث افزایش اختلاط سوخت، بهبود عملکرد احتراق و کاهش ناپایداری‌های احتراق شوند [11]. بنابراین می‌توان نازل‌های غیردایروی را به‌عنوان عملگرهای غیرفعال در کاربردهای ویژه مورد استفاده قرار داد [12]. از طرفی در برخی از هندسه‌های غیردایروی همچون بیضوی و مستطیلی پدیده تغییر محور رخ می‌دهد که بررسی فیزیک آن بسیار مورد توجه است. وقتی جت مایع از یک نازل کشیده همچون مستطیلی یا بیضوی خارج می‌شود، نیروی سطحی می‌خواهد که با کم کردن مساحت سطح و رسیدن به شکلی دایروی به حداقل انرژی ممکن برسد، در طی این تغییر یک سرعت عرضی ایجاد می‌شود که تمایل به ادامه حرکت دارد و بنابراین 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. در واقع در این پدیده، با حرکت جت به سمت پایین، محورهای بزرگ و کوچک جت جابه‌جا می‌شود. در شکل (۱) این پدیده برای یک نازل مستطیلی و در عدد وبر ۳۲۹ نشان داده شده‌است.

شکست جت مایع و پاشش آن دارای کاربردهای فراوان و متنوعی در صنایع مختلف می‌باشد. به‌عنوان مثال می‌توان به پاشش رنگ در صنایع رنگ‌آمیزی، پاشش سوخت در موتورهای احتراقی، کنترل‌گر ماهواره‌ها، تزریق جوهر در چاپگرها، اسپری‌های دارویی در صنایع داروسازی، انژکتورهای پاشش آب در صنایع کشاورزی، جت‌های آب برای برش قطعات صنعتی و موارد گوناگون دیگر اشاره کرد. این کاربرد گسترده باعث شده‌است که محققان زیادی به پژوهش بر روی فیزیک شکست و پاشش جت مایع بپردازند و جنبه‌های گوناگون آن را مورد بررسی قرار دهند. فهم درست پدیده شکست و تعیین نحوه اثرپذیری آن از پارامترهای مختلف، عامل کلیدی در طراحی سیستم‌های پاشش و بهینه‌سازی آن در جهت متناسب با کاربری آن می‌باشد. از همین رو پیشینه تحقیق بر روی نازل‌های تزریق جت مایع به بیش از ۱۷۰ سال پیش باز می‌گردد.

ساوارت [1] نشان داد که طول شکست یک جت دایروی با حاصل ضرب سرعت جت در قطر آن متناسب است. پلاتو [2] اولین آنالیز تحلیلی را بر روی پایداری ستون جت دایروی انجام داد و نشان داد که جت مایع برای کمینه کردن انرژی سطحی خود تمایل به شکسته شدن و تبدیل شدن به قطره را دارد که دارای مساحت سطح کمتری نسبت به ستون جت مایع است. با نادیده گرفتن اثرات گاز محیط (گازی که جت به درون آن تزریق می‌شود)، اثرات ویسکوزیته جت مایع و همچنین نیروی گرانشی، ریلی [3, 4] تئوری پایداری خطی خود را ارائه کرد و نشان داد که اگر تنها نیروهای موینگی در نظر گرفته شوند، یک جت دایروی زمانی ناپایدار می‌شود که در معرض اغتشاشات متقارن با طول موج بزرگ‌تر از محیط جت قرار بگیرد. وبر [5] با گسترش تئوری ریلی توانست برای سرعت‌های پایین، اثرات لزجت مایع و چگالی گاز محیط را نیز در نظر بگیرد. او نتیجه گرفت که اثرات لزجت همواره باعث افزایش طول موج اغتشاشی می‌شود که به‌ازای آن شکست جت مایع آغاز می‌شود. پس از آن تیلور [6]



شکل ۱. پدیده تغییر محور در جت‌های بیضوی و مستطیلی

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که مطالعه جامعی در این زمینه انجام نشده است. کونکاچابو و همکاران [18] به بررسی شیارهای مستطیلی برای استفاده در رآکتورهای هسته‌ای می‌پردازد و از فلز مذاب به‌عنوان مایع استفاده می‌کند. در کاری دیگر، نگید و همکاران [19] به بررسی تجربی صفحه مایع تشکیل شده از چهار شیار مستطیلی با گوشه‌هایی دایروی پرداخته‌است.

با در نظر گرفتن پیشینه مطالعات صورت گرفته، می‌توان نتیجه گرفت که هنوز پژوهشی جامع در مورد تزریق جت مایع از نازل‌های مستطیلی صورت نگرفته‌است و رفتار شکست آن و خصوصاً پدیده شکست در آن مورد بررسی قرار نگرفته‌است. از طرفی با توجه به رفتارهای مشابه جت‌های بیضوی و مستطیلی، مقایسه دقیق و جامع بین این دو هندسه ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله با استفاده از جت‌های بیضوی، مستطیلی و دایروی (به‌عنوان هندسه مرجع) و با استفاده از آب به‌عنوان مایع جت، تزریق جت‌های مایع با هندسه‌های غیردایروی در اتمسفر ساکن مورد بررسی قرار گرفته‌است و پارامترهای مختلف جریان یعنی طول شکست جت، طول موج تغییر محور و دامنه آن مورد مطالعه قرار گرفته‌است.

تجهیزات تجربی

سه انژکتور با هندسه‌های بیضوی، مستطیلی و دایروی،

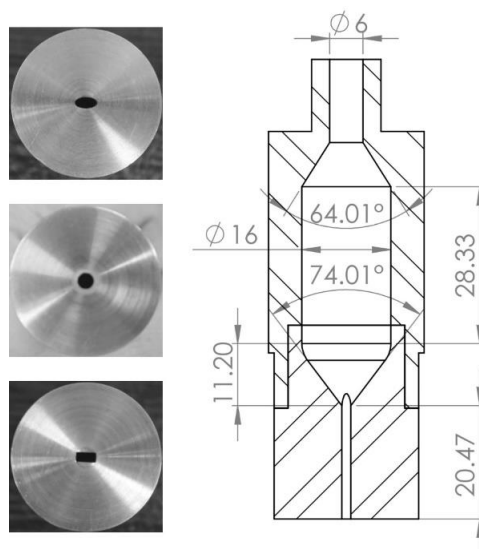
مگنس [13] برای اولین بار به بررسی جت خروجی از نازل‌های غیردایروی پرداخت و پدیده تغییر محور را مورد بررسی قرار داد. او هندسه‌های مختلفی همچون مستطیلی، بیضوی، سه‌گوش، صلیبی و غیره را مورد بررسی قرار داد. با این‌همه در مطالعات صورت گرفته بر روی هندسه‌های غیردایروی، تمرکز اصلی بر روی نازل‌های بیضوی بوده‌است. کاسیپ و همکاران [14] به بررسی تجربی نازل‌های بیضوی پرداختند. در این پژوهش ۶ نازل بیضوی با ضرایب منطری مختلف به‌همراه ۲ اریفیس دایروی به‌عنوان نازل مرجع، آزمایش شدند. در ادامه همین کار، کاسیپ و همکاران [15] با استفاده از همین نازل‌ها و تنها با اضافه کردن مخلوط یک‌به‌یک آب-گلیسرول به‌عنوان مایع جت در کنار آب، به بررسی اثرات تنش سطحی بر روی مشخصه‌های نازل‌های بیضوی پرداختند. همچنین امینی و دولت‌آبادی [16] به بررسی تحلیلی و تجربی اثرات اغتشاش بر روی جت‌های بیضوی پرداختند. شارما و فانگ [17] به بررسی تجربی شکست جت آب از چهار نازل دایروی، مستطیلی، مربعی و سه‌گوش پرداختند. در این مقاله اثر فشارهای بسیار بالا مورد بررسی قرار گرفته‌است. وانگ و فانگ [12] در ادامه کار قبلی و با استفاده از همان نازل‌ها، به‌صورت دقیق‌تر به بحث در مورد پدیده تغییر موج پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که برای نازل‌های مربعی و سه‌گوش این پدیده رخ نمی‌دهد.

پارامترهای مختلف جت مایع، سرعت جریان آب از 0.24 متر بر ثانیه تا 4.6 متر بر ثانیه تغییر کرده است. با محاسبه عدد وبر از رابطه (۱)، گستره بررسی عدد وبر بین 2.17 تا 792 می باشد.

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

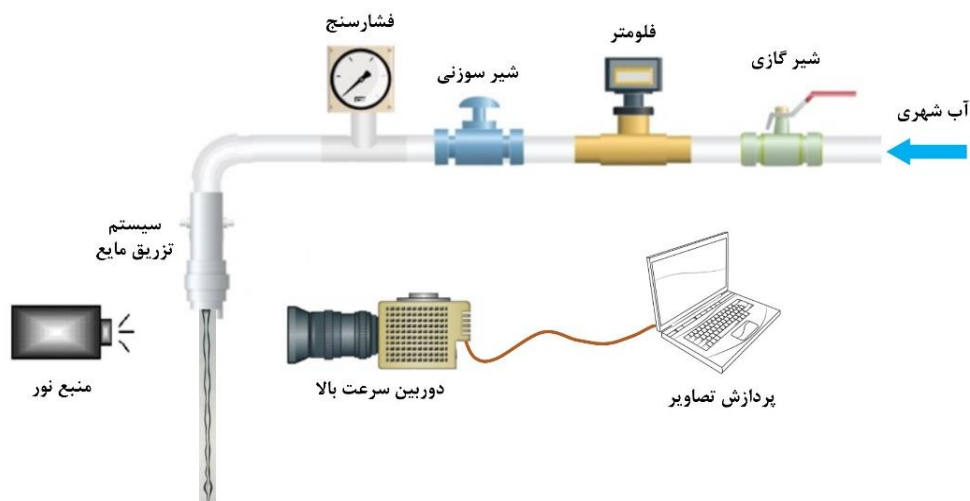
که در این رابطه ρ چگالی مایع، V سرعت جریان مایع، D قطر معادل انژکتور و σ ضریب تنش سطحی مایع می باشد که برای آب 0.0728 نیوتون بر متر است. برای گرفتن تصاویر با کیفیت بالا و در مدت زمان خیلی کوتاه به گونه ای که قادر به ثبت پدیده های با فرکانس بالا باشد، از یک دوربین سرعت بالای Nikon 1 J4، مجهز به لنز نیکور 30-10 میلی متری بهره گرفته شده است. این دوربین قادر به عکس برداری در مدت زمان 62.5 میکروثانیه می باشد. این زمان به اندازه کافی کوچک است که بتوان پدیده های مختلف جریان را مشاهده کرد. چنان که به صورت طرح واره در شکل (۳) آمده است، یک منبع نوری در پشت جریان جت قرار گرفته که به واسطه آن، سایه تشکیل شده از جت توسط دوربین ثبت می شود. برای اندازه گیری ابعاد پیکسل یک عکس، از یک نشانگر با قطر مشخص استفاده شده است. یک برنامه پردازش تصویر برای تحلیل عکس ها نوشته شده است که با پیدا کردن نشانگر و شمارش تعداد پیکسل های آن، اندازه دقیق هر پیکسل را محاسبه می کند. همچنین این برنامه قادر به اندازه گیری پارامترهای مورد نظر جت از جمله طول شکست، قطر جت و طول موج تغییر محور می باشد. نتایج به دست آمده در هر شرایط آزمایشی از میانگین ۵۰ عکس به دست آمده است.

از جنس استیل و با استفاده از ماشین کاری برش سیم ساخته شده است. نقشه ساخت انژکتورها به همراه تصویر سه هندسه آزمایش شده در شکل (۲) آمده است. به منظور میرا کردن ناپایداری های احتمالی جریان، محفظه آرامشی به طول و قطر 28.33 و 16 میلی متر قبل از ورود جریان به انژکتور تعبیه شده است. دقت لازم برای جلوگیری از ایجاد پله در نقطه اتصال این دو بخش به کار گرفته شد. مخروطی با نیم زاویه ۳۷ درجه جریان مایع را به جت خروجی می رساند. نسبت منبری انژکتورهای بیضوی و مستطیلی (نسبت طول بزرگ به طول کوچک) برابر ۲ و مساحت هر سه انژکتور 6.283mm² می باشد.



شکل ۲ نقشه ساخت انژکتورها به همراه محفظه آرامش جریان

در این پژوهش از آب لوله کشی شهر به عنوان مایع تزریقی استفاده شده است. در سرعت های پایین، دبی جریان با اندازه گیری میزان آب تخلیه شده در یک زمان ثابت و در سرعت های بالا از یک روتامتر استفاده شده است. دبی جریان توسط یک شیر سوزنی قابل کنترل است. در شکل (۳) نمای کلی سیستم تزریق آب نمایش داده شده است. برای بررسی تغییرات



شکل ۳ طرح‌واره سیستم آزمایشگاهی

جریان کاملاً آرام است و امواج تشکیل شده بر روی جت که منجر به شکست ستون مایع می‌شوند کاملاً متقارن می‌باشند. نوع شکست در این بازه از نوع شکست ریلی است که در این رژیم نیروهای سطحی کاملاً غالب هستند و اثرات آیرودینامیکی هوای اطراف کاملاً ناچیز و قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

طول شکست ستون مایع تا عدد وبر 10.3 افزایش می‌یابد و پس از آن کاهش ناگهانی پیدا می‌کند. این کاهش ناگهانی به دلیل تقویت شدن اثرات گاز اطراف و شروع رژیم شکست باد القیایی اول (First wind induced) است. در واقع با افزایش تدریجی سرعت جت تزریقی، آرامی سطح جت دستخوش تغییرات می‌شود و ناپایداری‌هایی با دامنه‌های خیلی کوچک بر روی آن شکل می‌گیرد که با بیشتر شدن سرعت جت، رشد می‌کنند و بر جریان اصلی غالب می‌شوند. در عدد وبر 42.1 طول شکست جت دایروی به مقدار کمینه خود می‌رسد. تا این عدد وبر می‌توان گفت که امواج تشکیل شده بر روی جت هنوز شکل متقارن خود را حفظ کرده‌اند.

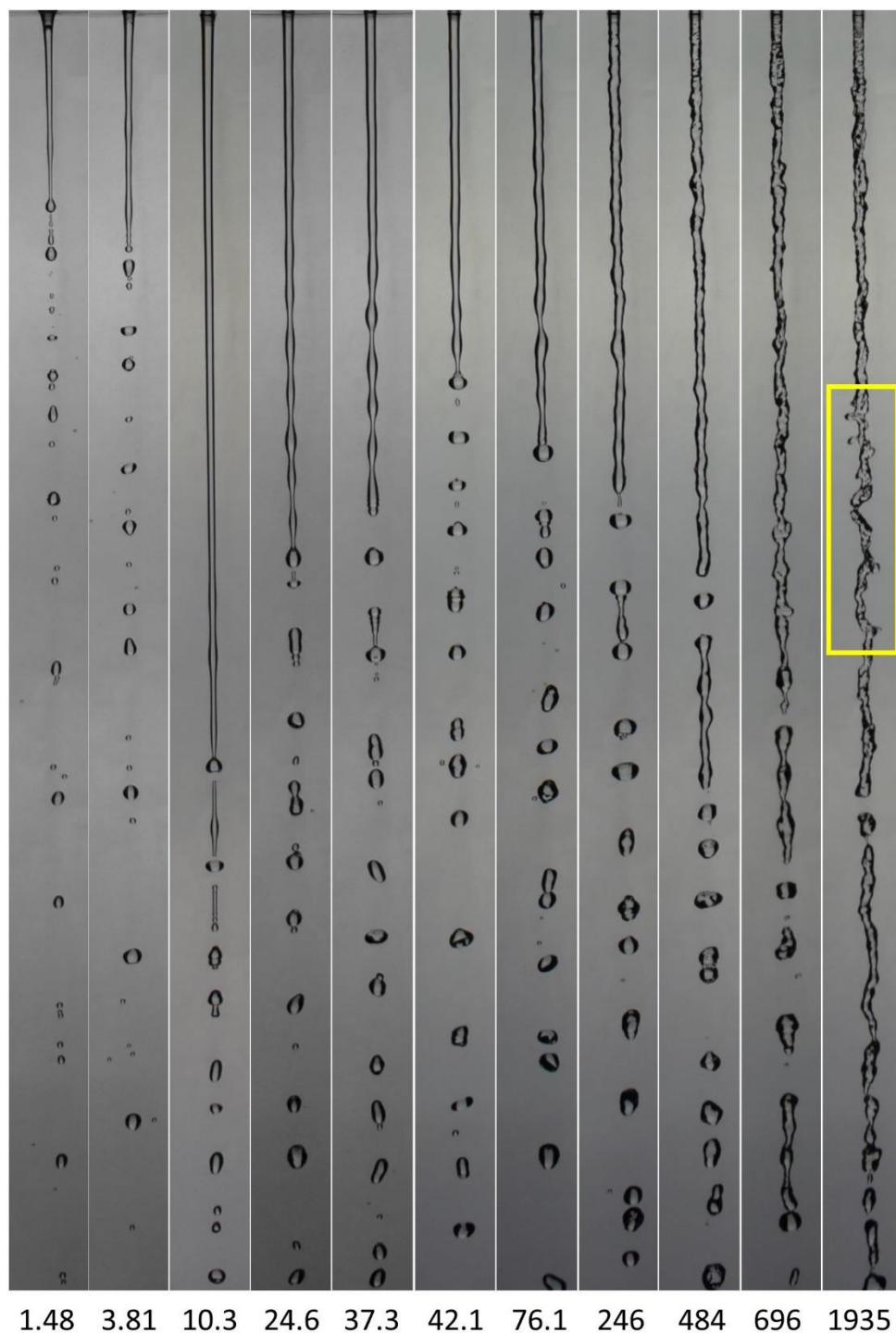
نتایج و بحث

نتایج به دست آمده در سه بخش ارائه می‌شود. ابتدا تصاویر به دست آمده از جت‌های مختلف مورد تحلیل قرار می‌گیرد و سپس در بخش بعد طول شکست هر جت بررسی می‌شود. در بخش نهایی، پدیده تغییر محور که در جت‌های بیضوی و مستطیلی رخ می‌دهد به طور کامل مورد بحث قرار خواهد گرفت.

آشکارسازی تصاویر تزریق جت در شرایط

مختلف

برای مطالعه بیشتر و امکان مقایسه رفتار شکست جت‌های بیضوی و مستطیلی، از یک جت دایروی به عنوان مرجع استفاده شده که رفتار کلی آن در مجموعه تصاویر شکل (۴) که در آن عدد وبر جت تزریقی تغییر می‌کند، آورده شده است. در این شکل، عدد زیر هر تصویر بیانگر عدد وبر مربوط به آن است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، در سرعت‌های پایین سطح جت کاملاً صاف و آرام است که هیچ آشفتگی بر روی آن دیده نمی‌شود. از مشاهده تصاویر می‌توان تخمین زد که تا عدد وبر 10.3 رژیم



شکل ۴ تزریق جت آب دایروی در اعداد وبر مختلف

(Second wind induced)، اثرات آیرودینامیکی گاز اطراف غالب می شود و طول شکست ستون مایع را کنترل می کند. در این رژیم ناپایداری های رشد یافته

با گذر افزایش عدد وبر جت از 42.1، طول شکست ستون مایع به تدریج افزایش پیدا می کند. در واقع با آغاز شدن رژیم جریان باد القایی دوم

خود می‌رسد. در عدد وبر 7.68 برای اولین بار پدیده تغییر محور قابل مشاهده است، اگرچه دامنه و طول موج آن به قدری کوچک است که به سختی قابل مشاهده است. با افزایش عدد وبر و بیشتر شدن نیروی اینرسی جریان که عامل اصلی رخ دادن پدیده تغییر محور است، شناسایی آن بر روی ستون جت به راحتی ممکن است. همچنین، همانند جت دایروی، اندازه قطرات جدا شده از جت نیز به صورت محسوسی بزرگ‌تر از قطرات جدا شده در رژیم ریلی می‌باشد. پس از عدد وبر 16 با افزایش سرعت، طول موج پدیده تغییر محور و همچنین طول شکست جت افزایش پیدا می‌کند. با توجه به این که پدیده تغییر محور بالانسی بین نیروهای اینرسی و سطحی است، با افزایش سرعت جت، طول موج تغییر محور نیز افزایش پیدا می‌کند. در عین حال با افزایش عدد وبر، تعداد دفعات تغییر محور در طول حرکت جت به سمت پایین کاسته می‌شود چرا که به دلیل رشد ناپایداری‌ها و شکست جت، فرصت کافی برای تغییر محور بیشتر در امتداد جت وجود ندارد.

با افزایش بیشتر عدد وبر و قوی تر شدن اثرات هوا، سطح جت رفتار نوسانی پیدا می‌کند و اغتشاش‌های نامتقارنی بر روی آن شکل می‌گیرد. این ناآرامی‌ها عامل اصلی شکست جت در این رژیم هستند. چنان که مشاهده می‌شود در اعداد وبر بالا، پدیده تغییر محور تنها دو تا سه بار رخ می‌دهد و پس از آن هندسه جریان به قدری به هم می‌ریزد که دیگر تشخیص هندسه جریان میسر نیست. در عدد وبر 792 پس از دومین تغییر محور، جریان کاملاً به هم می‌ریزد و شکل بیضوی خود را به طور کامل از دست می‌دهد. در این سرعت جت کاملاً در رژیم القایی باد دوم قرار می‌گیرد و شکست عمدتاً به خاطر موج‌هایی با طول پایین و فرکانس بالا است که بر روی سطح جت رشد کرده‌اند. باید اشاره شود که مشابه جت دایروی، جدا شدن تکه‌ای در جت‌های بیضوی نیز مشاهده شده است، اگرچه این پدیده در شکل (۵) نمایش داده نشده است.

بر روی سطح جت منجر به شکست ستون جت می‌شود و اثر نیروهای سطحی دیگر قابل ملاحظه نیست. تصاویر شکل (۴) همچنین نشان می‌دهد که در سرعت بالا جدا شدن تکه‌ای (Ligament) از روی ستون مایع مشاهده می‌شود. همچنین قطرات تشکیل شده در این رژیم به صورت محسوسی بزرگ‌تر از قطرات شکل گرفته در سرعت‌های پایین هستند. به منظور مشاهده رفتار جت در سرعت‌های بالا، جت آب در عدد وبر 1935 تزریق شد. می‌توان مشاهده کرد که در این سرعت امواج عرضی بر روی ستون جت تشکیل شده‌اند که منجر به جدا شدن تکه‌ای مایع از روی سطح جت قبل از شکست آن شده است. این پدیده‌ها بر روی شکل با کادر زرد رنگ مشخص شده‌اند. همچنین در این عدد وبر تکه جدا شده از ستون جت پس از شکست بسیار بزرگ‌تر از تکه‌های ایجاد شده در سرعت‌های پایین تر است.

شکل (۵) جت خروجی از نازل بیضوی را در اعداد وبر مختلف نمایش می‌دهد. در تمامی این تصاویر عکس برداری نسبت به محور بزرگ جت بیضوی بوده است. ابعاد جت‌های این تصاویر مطابق شکل، در اعداد وبر پایین کمتر از 5.64، جت بیضوی کاملاً تحت تأثیر نیروی سطحی قرار دارد و در فاصله کوتاهی پس از خروج از نازل، شکل دایروی به خود می‌گیرد و اثرات هندسه اولیه جت سریعاً میرا می‌شود. تا این عدد وبر، جریان در رژیم ریلی قرار دارد و طول شکست به صورت خطی به سرعت افزایش پیدا می‌کند تا این که در عدد وبر 5.64 به مقدار بیشینه خود می‌رسد. چنان که در شکل‌ها دیده می‌شود، ناپایداری‌های تشکیل شده در نزدیکی نقطه شکست ستون جت کاملاً متقارن هستند.

با افزایش سرعت جریان جت، اثرات آیرودینامیکی هوای اطراف به تدریج مهم می‌شود و با وارد شدن جریان به رژیم اول باد القایی، طول شکست آن کاهش پیدا می‌کند و در عدد وبر 16 به مقدار کمینه



شکل ۵ تغییرات رفتار شکست جت بیضوی در اعداد وبر مختلف

هم‌مقیاس کردن ابعاد جت در بین همه تصاویر انجام شده است. در اعداد وبر پایین، وقتی که جریان کاملاً آرام است، هندسه مستطیلی جت خیلی سریع توسط

در شکل (۶) تصاویر جت تزریقی از نازل مستطیلی در اعداد وبر مختلف نمایش داده شده است. یکسان نبودن طول تصاویر در این شکل به منظور

است، اما با پیشروی در جهت جریان که با رشد ناپایداری‌ها همراه است، سطح جت دستخوش تغییر می‌شود و اعوجاج‌هایی بر روی آن شکل می‌گیرد.

با افزایش بیشتر سرعت جت، اثرات آیرودینامیکی گاز تشدید می‌یابد و بر نیروی سطحی غلبه می‌کند، به طوری که ناآرامی‌ها و نوسان‌های ریز بر روی سطح جت شکل می‌گیرد. در این رژیم جریان، موج‌های شکل‌گرفته بر روی سطح جت وضعیت متقارن خود را از دست می‌دهند و به صورت نامتقارن ظاهر می‌شوند. چنان‌که در شکل نمایش داده شده است، طول شکست ستون جت با افزایش عدد وبر افزایش پیدا می‌کند و همانند جت‌های بیضوی و دایروی قطر قطرات تشکیل شده به طور محسوسی بیشتر می‌شود. همچنین برخلاف سرعت‌های پایین، قطرات ماهواره‌ای کمتری مشاهده می‌شود. جدا شدن تکه‌ای جت مایع از ستون جت اصلی نیز در اعداد وبر بالا قابل رؤیت است. همانند طول شکست، طول موج تغییر محور نیز با افزایش سرعت جت افزایش پیدا می‌کند. طولانی‌تر شدن طول شکست به همراه افزایش ناپایداری‌های جریان در سرعت‌های بالا، باعث می‌شود که تعداد دفعات وقوع تغییر محور کاهش چشم‌گیری پیدا کند به طوری که در اعداد وبر بالا تنها 2 یا 3 بار تغییر محور رخ می‌دهد. در حقیقت در اعداد وبر بالای 404، هندسه ستون جت تحت تأثیر اثرات هوا به طور کامل به هم می‌ریزد و دیگر امکان تعیین یک هندسه مشخص برای ستون جت وجود ندارد. در این سرعت‌ها، موج‌هایی با طول موج کوتاه و فرکانس بالا بر روی ستون جت شکل می‌گیرند که عامل اصلی شکست جت می‌باشند. در این رژیم، دیگر اثرات نیروی سطحی قابل اهمیت نیستند.

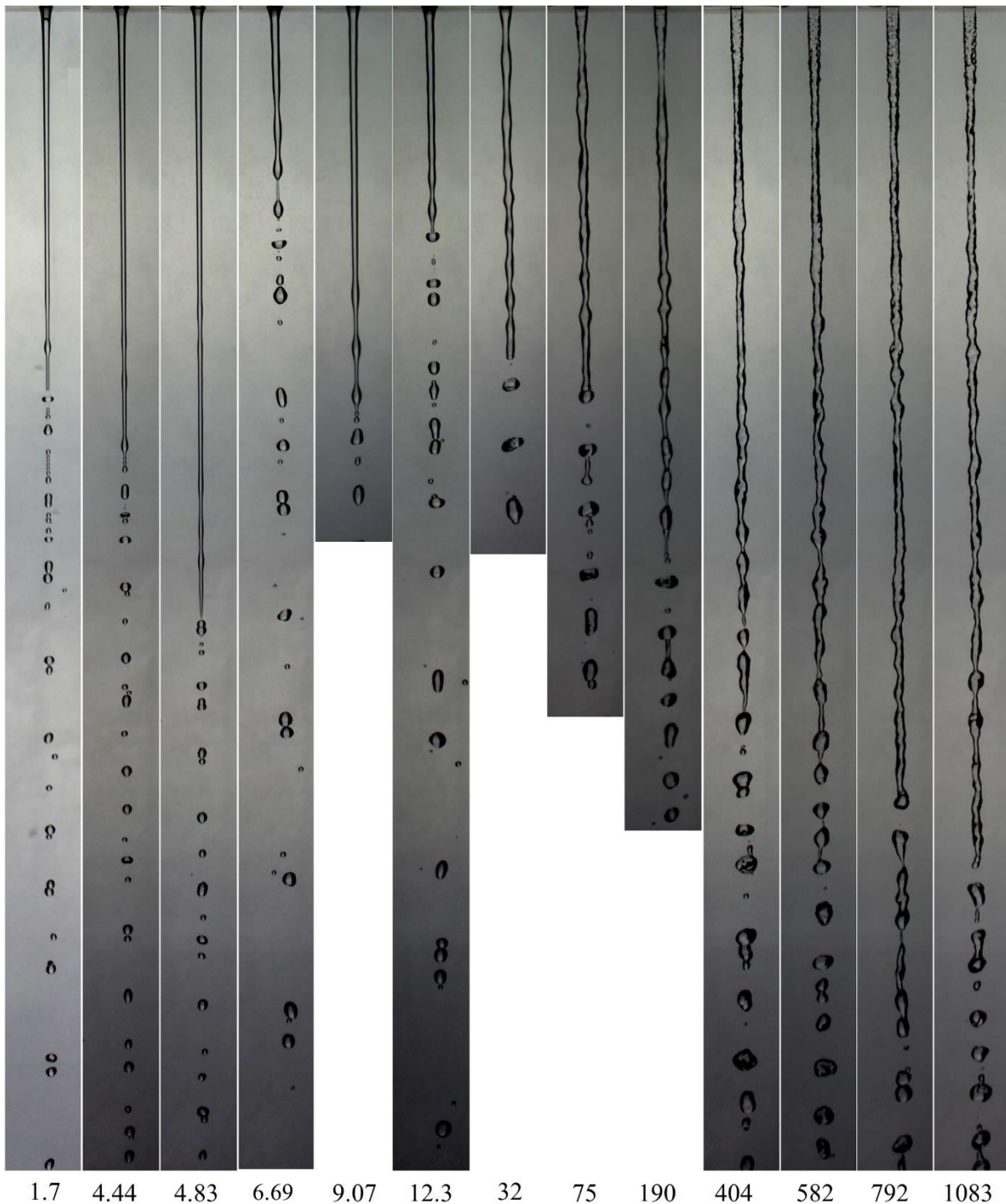
از نکات قابل توجه جت مستطیلی، تغییر شکل آن از هندسه مستطیلی به شبه بیضوی است. در سرعت‌های پایین، به واسطه نیروی سطحی قوی، گوشه‌های ۹۰ درجه جت مستطیلی سریعاً پخ می‌شود و شکل دایروی

نیروی سطحی از بین می‌رود و در دو مرحله از مستطیلی به شبه بیضوی و سپس به شکل دایروی تغییر پیدا می‌کند. در این رژیم سرعت، سطح جت کاملاً صاف و آرام است و شکست ستون جت تحت تأثیر نیروی سطحی رخ می‌دهد. تا عدد وبر 4.83 جت در رژیم ریلی قرار دارد و طول شکست آن با افزایش سرعت زیاد می‌شود. در مقایسه با جت بیضوی می‌توان گفت که به دلیل ناپایداری بیشتر جت‌های مستطیلی که به خاطر گوشه‌های زاویه دار آن وارد جریان می‌شود، طول شکست کمتر و رژیم ریلی زودتر پایان می‌یابد، به گونه‌ای که در عدد وبر 4.83، طول شکست به مقدار بیشینه خود می‌رسد. در مقایسه با جت بیضوی، جت مستطیلی در سرعت پایین تری به مقدار کمینه طول شکست خود می‌رسد. کمینه طول شکست در جت بیضوی در عدد وبر 16 حاصل می‌شود، در حالی که برای جت مستطیلی در عدد وبر 6.69 به طول شکست کمینه خود می‌رسد. در همین عدد وبر پدیده تغییر محور بر روی سطح جت قابل مشاهده است که به نظر می‌رسد با اختلاف کمی، زودتر از جت بیضوی پدیده تغییر محور رخ داده است.

از تفاوت‌های اصلی جت مستطیلی با جت بیضوی افزایش ناگهانی طول شکست و کاهش دوباره آن است به گونه‌ای که یک نقطه بیشینه ثانویه برای طول شکست در عدد وبر 9.07 اتفاق می‌افتد. این افزایش ناگهانی طول شکست در کار وانگ و فانگ [12] نیز برای جت‌های مربعی و سه گوش گزارش شده است. چنان‌که از شکل دیده می‌شود طول شکست ثانویه از طول شکست اولیه کوتاه‌تر است. با افزایش بیشتر عدد وبر، طول شکست دوباره کاهش پیدا می‌کند که پس از آن افزایش بیشتر عدد وبر، به صورت پیوسته طول شکست را نیز افزایش می‌دهد. در عدد وبر 32 پدیده تغییر محور به خوبی قابل مشاهده است. در این عدد وبر، سطح جت به میزان قابل توجهی در بالادست جریان و نواحی نزدیک به صفحه خروجی جت صاف و آرام

و با فاصله بیشتری از صفحه خروجی گوشه‌های آن پخ می‌شود.

به خود می‌گیرد. با مقایسه تصاویر ستون جت در سرعت‌های بالا که دارای نیروی اینرسی بیشتر است، هندسه مستطیلی جت بیشتر در جریان ادامه پیدا می‌کند



شکل ۶ رفتار شکست جت مستطیلی در اعداد ویر مختلف

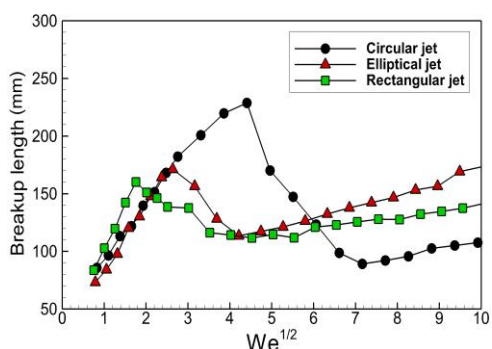
طول شکست و دسته‌بندی رژیم جریان

اندازه‌گیری طول شکست میانگین برای ستون جت آب تزریقی از انژکتورهای دایروی، بیضوی و مستطیلی و برای شرایط جریان متفاوت انجام شد. اولین نقطه‌ای که جت آب از ستون اصلی جدا می‌شود، به صورت قطره یا تکه‌ای، به عنوان طول شکست در نظر گرفته شده است. مقادیر گزارش شده در واقع میانگین ۵۰ عکس مختلف است و بیشینه خطای اندازه‌گیری طول درصد بوده است. باید توجه شود که شکست کمتر از طول شکست لحظه‌ای به دلیل ناپایداری‌ها حول این مقدار میانگین نوسان می‌کند. به همین دلیل است که طول شکست در تصاویر نمایش داده شده در شکل‌های (۴، ۵، ۶) ممکن است با مقادیر میانگین گزارش شده اختلاف داشته باشد. مقادیر طول شکست میانگین جت برای مجذور عدد وبر بین ۲ تا ۳۰ در شکل (۷) گزارش شده است. برای بررسی بهتر تغییرات طول شکست میانگین در اعداد وبر خیلی پایین، تغییرات آن در بازه کوتاه‌تری از اعداد وبر در شکل (۸) آمده است. مطابق شکل (۷)، رفتار کلی طول شکست برای هر سه جت تقریباً یکسان است به گونه‌ای که برای هر سه جت طول شکست در ابتدا به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند، به یک نقطه بیشینه می‌رسد، سپس کاهش پیدا می‌کند تا به کمینه خود برسد و پس از آن دوباره روند افزایشی پیدا می‌کند. این روند افزایشی تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که جت وارد رژیم‌های باد القایی دوم و اتمیزاسیون شود که در آن معیار مناسبی برای تعیین طول شکست ستون جت وجود ندارد. در هر صورت بالاترین سرعت تست شده در این پژوهش نیز محدود به رژیم باد القایی دوم است. از کمترین سرعتی که به ازای آن ستون جت تشکیل می‌شود (در سرعت‌های پایین‌تر مایع به صورت قطره‌ای چکیده می‌شود) تا بیشینه محلی طول شکست، جت در رژیم ریلی قرار دارد و چنان‌که گفته شد افزایش طول شکست رفتاری

خطی دارد که برای هر سه جت این رفتار مشاهده می‌شود. از طول شکست بیشینه تا طول شکست کمینه پیرو آن، جریان در رژیم باد القایی اول قرار دارد که در این رژیم به خاطر تشدید اثرات آیرودینامیکی هوا، طول شکست کاهش پیدا می‌کند. در هر دو رژیم ریلی و باد القایی اول، وجود ناپایداری‌های با طول موج بلند و فرکانس پایین عامل اصلی شکست ستون جت است.

با گذر از نقطه کمینه طول شکست و آغاز روند افزایش طول شکست با سرعت جریان، رژیم باد القایی دوم آغاز شده است. در این رژیم ناپایداری‌های با طول موج کوتاه و فرکانس بالا دلیل اصلی شکست ستون جت می‌باشند و نیروی اینرسی جت قوی‌تر از نیروی سطحی آن می‌باشد. چنان‌که در شکل (۷) نمایش داده شده است، در این رژیم طول شکست جت دایروی با فاصله محسوسی کوتاه‌تر از جت‌های بیضوی و مستطیلی می‌باشد. نقطه قابل توجه این است که طول شکست جت‌های مستطیلی و بیضوی در این رژیم جریان به هم نزدیک هستند و تفاوت کمی مشاهده می‌شود که با توجه به مشابه بودن فیزیک کلی جت‌های بیضوی و مستطیلی، این نتیجه دور از انتظار نیست. بالاتر بودن طول شکست جت‌های مستطیلی و بیضوی از جت دایروی در رژیم جریان باد القایی دوم به دلیل حضور پدیده تغییر محور است. این پدیده که در جت دایروی روی نمی‌دهد، در رژیم باد القایی دوم نقش پایدارکننده دارد و باعث می‌شود که طول شکست جت افزایش پیدا کند. نزدیک بودن رفتار شکست جت‌های بیضوی و مستطیلی نشان از نقش عمده این پدیده در کنترل پایداری جریان جت‌ها دارد.

رفتار طول شکست میانگین جت‌های دایروی، بیضوی و مستطیلی برای سرعت‌های پایین در شکل (۸) بررسی شده است. چنان‌که اشاره شد، در رژیم ریلی طول شکست برای هر سه جت به صورت خطی افزایش می‌یابد. مطابق شکل (۸)، در این رژیم طول



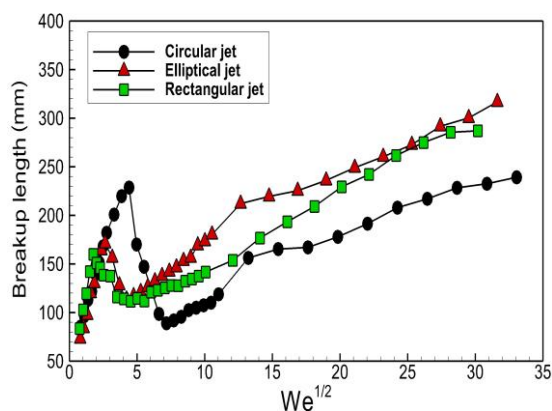
شکل ۸ نمودار طول شکست جت‌های بیضوی، مستطیلی و دایروی در اعداد وبر پایین

پدیده تغییر محور

مشخصات پدیده تغییر محور برای جت‌های بیضوی و مستطیلی مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه طول موج پدیده تغییر محور و دامنه آن محاسبه شده است. در اعداد وبر پایین به دلیل قوی تر بودن نیروی سطحی و میرا شدن سریع هندسه اولیه جت، پدیده تغییر محور رخ نمی‌دهد. اما با افزایش سرعت جریان و مقابله نیروی اینرسی با نیروی سطحی، پدیده تغییر محور به تدریج و با دامنه و طول موج کوتاه شکل می‌گیرد. روند تشکیل پدیده تغییر محور به خوبی در شکل‌های (۵ و ۶) قابل مشاهده است. مطابق شکل (۱)، فاصله دو نقطه بیشینه یا کمینه ستون به عنوان طول موج تغییر محور در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این که در این پژوهش عکس برداری از زاویه مقابل محور بزرگ جت‌های مستطیلی و بیضوی انجام شده است، فاصله دو نقطه کمینه ستون جت به عنوان طول موج تغییر محور در نظر گرفته شده است.

نتایج به دست آمده برای هر دو جت در شکل (۹) آمده است. چنان که دیده می‌شود، عدد وبر بحرانی که به ازای آن پدیده تغییر محور آغاز می‌شود تقریباً برای هر دو جت یکسان است و تفاوت بسیار ناچیزی بین جت‌های بیضوی و مستطیلی وجود دارد. از طرفی، چنان که در مراجع مختلف گزارش شده است، تغییر طول موج تغییر محور با عدد وبر رفتاری نسبتاً خطی

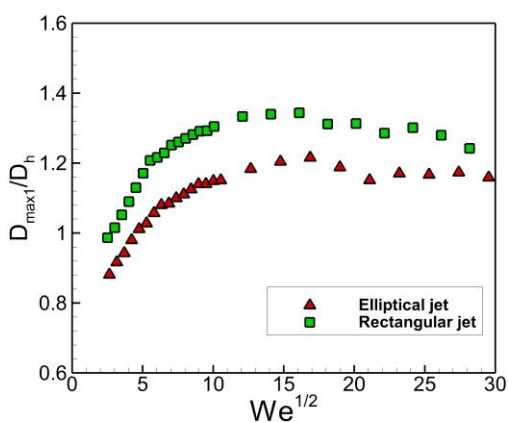
شکست جت مستطیلی از جت‌های دایروی و بیضوی بیشتر می‌باشد و زودتر از دو جت دایروی و بیضوی به نقطه بیشینه که پس از آن رژیم باد القایی اول آغاز می‌شود، می‌رسد. طولانی تر بودن رژیم ریلی برای جت‌های دایروی توسط کاسیاب و همکاران [15] نیز گزارش شده است. در واقع با توجه به این که جت‌های بیضوی و مستطیلی دارای محیط بیشتری نسبت به جت دایروی هستند، در نتیجه سطح تماس آنها با هوای اطراف بیشتر می‌شود و زودتر تحت تأثیر اثرات آیرودینامیکی قرار می‌گیرند. به همین دلیل است که این دو جت زودتر از جت دایروی وارد رژیم جریان باد القایی اول می‌شوند. از نکات قابل توجه، رفتار شکست جت مستطیلی است که برخلاف جت‌های دیگر، در نمودار آن یک نقطه بیشینه ثانویه دیده می‌شود. این بیشینه ثانویه که توسط وانگ و فانگ [12] برای جت‌های مربعی و سه گوش نیز مشاهده شده است. همچنین باید اشاره کرد که طول شکست جت مستطیلی در سرعت‌های خیلی پایین که پدیده تغییر محور رخ نمی‌دهد، اندکی بیشتر از جت‌های دیگر است. دلیل این امر می‌تواند گوشه‌های تیز جت مستطیلی باشد که پس از طی فاصله کوتاهی توسط کشش سطحی گرد می‌شوند.



شکل ۷ نمودار شکست ستون جت‌های بیضوی، دایروی و مستطیلی

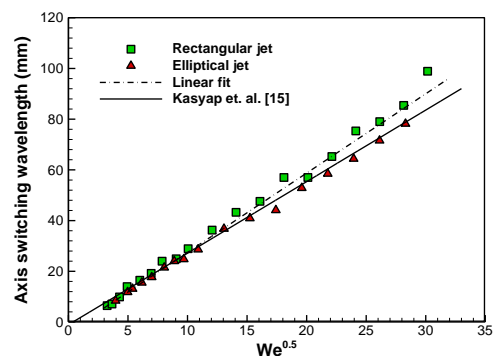
دامنه موج تغییر محور برای جت‌های بیضوی و مستطیلی در شرایط مختلف جت به دست آمده و با قطر هیدرولیک هر جت بدون بعد شده است. تغییرات دامنه موج بدون بعد با مجذور عدد وبر در شکل (۱۰) آمده است. مطابق شکل دامنه موج در سرعت‌های پایین برای هر دو جت به صورت نسبتاً خطی افزایش پیدا می‌کند تا این که سرانجام به یک نقطه بیشینه می‌رسد. نقطه بیشینه برای هر دو جت تقریباً در عدد وبر یکسانی اتفاق می‌افتد. پس از این نقطه بیشینه، دامنه موج با شیب کم روند کاهشی پیدا می‌کند که این روند برای هر دو جت تقریباً یکسان است. بزرگ‌تر بودن دامنه موج جت مستطیلی نشان می‌دهد که این جت قابلیت نفوذ بیشتری نسبت به جت بیضوی دارد. باید اشاره شود که با افزایش سرعت جت و شکل‌گیری ناآرامی‌های مختلف بر روی ستون جت، هندسه آن به قدری دچار تغییر شکل می‌شود که امکان در نظر گرفتن معیار مناسبی برای اندازه‌گیری دامنه موج تغییر محور وجود ندارد. به همین دلیل است که اندازه‌گیری دامنه موج همانند طول موج، به بازه خاصی محدود می‌شود.

دارد. این رفتار خطی در شکل (۹) برای هر دو جت بیضوی و مستطیلی مشاهده می‌شود. همچنین، نتایج موجود با کار کاسیپ و همکاران [15] برای جت بیضوی با هم مقایسه شده است که تطابق عالی بین آنها وجود دارد. یکسان بودن طول موج تغییر محور در اعداد وبر پایین برای هر دو جت مستطیلی و بیضوی نشان می‌دهد که در سرعت‌های پایین این پدیده تا حد زیادی از هندسه جت مستقل است. البته باید توجه داشت که در این بررسی تنها یک جت بیضوی با یک جت مستطیلی مقایسه شده است و ممکن است برای هندسه‌های با ضرایب منظری بزرگ‌تر این وضعیت تغییر کند. با افزایش عدد وبر، مشاهده می‌شود که طول موج تغییر محور جت مستطیلی بزرگ‌تر می‌شود و شیب نمودار آن بیشتر می‌گردد. به کمک نتایج به دست آمده، رابطه نیمه تجربی (۲) برای محاسبه طول موج تغییر محور تخمین زده شده است. طول موج به دست آمده در این رابطه بر حسب میلی‌متر می‌باشد. باید توجه داشت که به دلیل رشد و گسترش ناپایداری‌های روی ستون جت در سرعت‌های بالا، اندازه‌گیری طول موج تغییر محور دیگر ممکن نیست و به همین دلیل، می‌توان گفت که این پدیده در بازه خاصی از اعداد وبر قابل رؤیت است.



شکل ۱۰ تغییرات دامنه بدون بعد پدیده تغییر محور با مجذور عدد وبر

$$\lambda_{cs} = 3.13We^{1/2} - 3.83 \quad (2)$$



شکل ۹ تغییرات طول موج تغییر محور با مجذور عدد وبر

نتیجه گیری

بزرگ تر است. درحالی که برای جت های مستطیلی و بیضوی طول شکست تقریباً برابر است. همچنین مشاهده شد که جت های بیضوی و مستطیلی زودتر وارد رژیم جریان باد القایی اول و دوم می شوند. از طرفی نشان داده شد که طول موج تغییر محور در سرعت های پایین به هندسه جت وابسته نیست، اما در سرعت های بالاتر آهنگ تغییرات آن با مجذور عدد وبر برای جت مستطیلی بیشتر از جت بیضوی است. برپایه این اندازه گیری ها، یک رابطه نیمه تجربی برای تخمین طول موج تغییر محور جت های بیضوی و مستطیلی پیشنهاد شد.

در این پژوهش، مشخصه های تزریق جت های آب بیضوی، مستطیلی و دایروی به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. به کمک روش سایه نگاری و با بهره گیری از یک دوربین سرعت بالا، تصاویر ستون جت در شرایط مختلف ثبت شد و به کمک آن ناپایداری ستون مایع در اعداد وبر مختلف مورد تحلیل قرار گرفت. پارامترهای اصلی جت های مستطیلی و بیضوی مورد مقایسه قرار گرفت و از جت دایروی به عنوان هندسه مرجع استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که در اعداد وبر بالا، طول شکست میانگین جت های بیضوی و مستطیلی به مراتب از جت دایروی

مراجع

1. Savart, F., "Mémoire Sur la Constitution des Veines Liquides Lancées par des Orifices Circulaires en Mince Paroi", *Ann. Chim. Phys*, Vol. 53, No. 337, (1833).
2. Plateau, J., "Statique Experimentale et. Theorique des Liquids Soumie aux Seules Forces", *Cauthier Villars, Paris*, Vol. 1 & 2, pp. 450-495, (1873).
3. Rayleigh, L., "On the Instability of Jets", *Proc. R. Soc. London*, Vol. 10, pp. 4-13, (1878).
4. Rayleigh, L., "On the Capillary Pheomena of Jets", *Proc. R. Soc. London*, Vol. 29, pp. 71-97, (1879).
5. Weber, C., "Zum Zerfall Eines Flüssigkeitsstrahles", *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, Vol. 11, No. 2, pp. 136-154, (1931).
6. Taylor, G.I., "Generation of Ripples by Wind Blowing over Viscous Fluids", *In The Scientific Papers of G.I. Taylor, ed. GK Batchelor*, Cambridge Univ., Vol. 3, pp. 244-254, (1962).
7. Bogy, D.B., "Drop Formation in a Circular Liquid Jet", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 11, No. 1, pp. 207-228, (1979).
8. Reitz, R.D., "Mechanisms of Breakup of Round Liquid Jets", *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol. 3, pp. 233-249, (1986).
9. Lin, S.P. and Reitz, R.D., "Drop and Spray Formation from a Liquid Jet", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 30, No. 1, pp. 85-105, (1998).
10. Birouk, M. and Lekic, N. "Liquid Jet Breakup in Quiescent Atmosphere: A Review", *Atomization and Sprays*, Vol. 19, No. 6, pp. 501-528, (2009).
11. Gutmark, E.J. and Grinstein, F.F., "Flow Control with Noncircular Jets", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 31, No. 1, pp. 239-272, (1999).
12. Wang, F. and Fang, T., "Liquid Jet Breakup for Non-circular Orifices under Low Pressures", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 72, pp. 248-262, (2015).
13. Magnus, G., "Hydraulische Untersuchungen", *Ann. Phys.*, Vol. 171, pp. 1-59, (1855).

14. Kasyap, T.V., Sivakumar, D. and Raghunandan, B.N., "Breakup of Liquid Jets Emanating from Elliptical Orifices at Low Flow Conditions", *Atomization and Sprays*, Vol. 18, No. 7, pp. 1-24, (2008).
15. Kasyap, T.V., Sivakumar, D. and Raghunandan, B.N. "Flow and Breakup Characteristics of Elliptical Liquid Jets", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 35, No. 1, pp. 8-19, (2009).
16. Amini, G. and Dolatabadi, A., "Axis-switching and Breakup of Low-speed Elliptic Liquid Jets", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 42, pp. 96-103, (2012).
17. Sharma, P. and Fang, T., "Breakup of Liquid Jets from Non-circular Orifices", *Experiments in Fluids*, Vol. 55, No. 2, pp. 1-17, (2014).
18. Konkachbaev, A.I., Morley, N.B., Gulec, K. and Sketchley, T., "Stability and Contraction of a Rectangular Liquid Metal Jet in a Vacuum Environment", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 51, pp. 1109-1114, (2000).
19. Negeed, E.S.R., Hidaka, S., Kohno, M. and Takata, Y., "Experimental and Analytical Investigation of Liquid Sheet Breakup Characteristics", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 32, pp. 95-106, (2011).

