



Experimental Comparison of Injection Characteristics of Elliptical and Circular Liquid Jets into an Air Crossflow

Y. Rezaei* and M. Tadjfar

Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: The flow characteristics of liquid jets issuing from elliptical and circular injectors into an air crossflow were experimentally investigated. Two elliptical injectors with different aspect ratios and a circular injector as the reference case with the same cross-sectional area were employed. The major axis of the elliptical nozzles was aligned parallel and perpendicular to the air crossflow direction. The liquid jet was visualized using shadowgraph technique and a high speed camera was used to record the instantaneous status of the jets. The results revealed that some characteristics of injected liquid jets into the air crossflow such as penetration depth and the trajectory of liquid jet were affected by changing the nozzle exit shape. Based on the obtained results elliptical liquid jets because of the lower stability than circular jet, break up sooner and penetrate lower into the air crossflow. As the normalized breakup height of circular jet is obtained 29.5 but the normalized breakup height of elliptic jet with the aspect ratio of 3 and when its major axis was perpendicular to the crossflow direction, is obtained 21.53. In this study two different breakup regimes were observed, column breakup and bag breakup regimes.

Review History:

Received: 14/09/2018
Revised: 12/11/2018
Accepted: 03/12/2018
Available Online: 20/12/2018

Keywords:

Crossflow
Injection of liquid jet
Elliptical jet
Jet column breakup
Trajectory of liquid jet

1. INTRODUCTION

The injection of liquid jets into an air crossflow also called Jet in Crossflow (JICF) has many practical applications in the air breathing engines such as diesel engines, gas turbine engines, ramjet and scramjet engines [1, 2]. The efficiency of these engines depend on dispersion, atomization and vaporization processes of injected liquid fuel jet [1]. According to Schetz et al. [3] the maximum penetration height of the injected liquid jet is the distance that the momentum of liquid jet required to redirect in the crossflow direction. Chen et al. [4] divided the injection of the liquid jet into three regions: liquid column, ligament and spray plume regions. Breakup regimes and locations of injected liquid jet were obtained by Wu et al. [5]. They investigated the breakup properties and the trajectory of injected liquid jets in subsonic air crossflow. They classified the column breakup region into four sub-regions: liquid column/capillary breakup, bag breakup, multi-mode breakup and shear breakup. Birouk et al. [6] studied the effect of changing the liquid viscosity on the primary breakup regimes. They found that the liquid viscosity has no effect on the mechanisms of breakup of jets in crossflow. Tambe et al. [7] investigated the effect of surface tension on the jet column behavior and they found in the surface breakup regime a liquid jet with low surface tension (Jet-A) produced smaller droplets than the other liquid with high surface tension (Water).

The main aim of this work is to study the effect of injection liquid jet from elliptical nozzle on characteristics such as liquid column trajectory, breakup location and the size of

established bags on the liquid column and also compare them with a circular jet having the same cross-sectional area.

2. EXPERIMENTAL APPARATUS

The wind tunnel is capable to provide a uniform air stream in the test section with a velocity raging between 0.2 m/s to 45.5 m/s. The test liquid was stored in the storage tank and pressurized with high pressure nitrogen gas. The liquid jet was injected into the air crossflow from the top of the test section through a nozzle which is mounted 200 mm downward of the inlet of the test section. Shadowgraph technique used for taking photos, an image processing code was developed to obtain required data from the photos. It should be noted that within this paper, “C” and “E” are abbreviations for circular and elliptical nozzle. Moreover, “E(0°)” means that the major axis of elliptic nozzle is parallel to the crossflow direction and “E(90°)” for when major axis of elliptic nozzle is perpendicular. The experimental details of the current study are presented in Fig. 1.

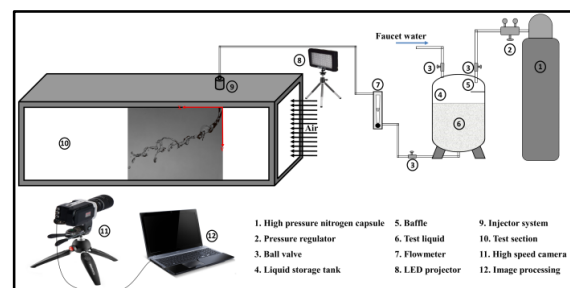


Fig. 1. Schematic of the experimental setup.

*Corresponding author's email: yrezaei@aut.ac.ir



3. RESULTS AND DISCUSSION

In this study two different breakup regimes which are column breakup, bag breakup regimes were observed. The visualized shadowgraphs of these breakup regimes, at two different air Weber numbers of $We_a = 2$ and 7 and the same momentum ratio $q = 20$ are presented in Fig. 2.

3.1. Liquid Column Trajectories

As shown in Fig. 3 the elliptical jet deflected more towards the air crossflow direction specially when the major axis of the nozzles was aligned perpendicular to the air crossflow direction. This is because of the fact that the elliptical liquid jet has frontal area as flat shape and this causes elliptical jet is more affected by the aerodynamic drag force which is consistent with the experiment observations of Song et al. [8].

3.2. Bag Formation

As air Weber number increases, the liquid jet deforms from its initial shape as a flat sheet. This deformation of the liquid column is due to the uneven pressure distribution at its sides. Bags appear and grow on the leeward side of the liquid column. These bags expand until the membrane of bags become thinner enough and surface tension of the liquid jet cannot hold them [9]. Fig. 4 illustrates bag formation and breakup process for 10 ms.



Fig. 2. Breakup regimes. A) Column, B) Bag.

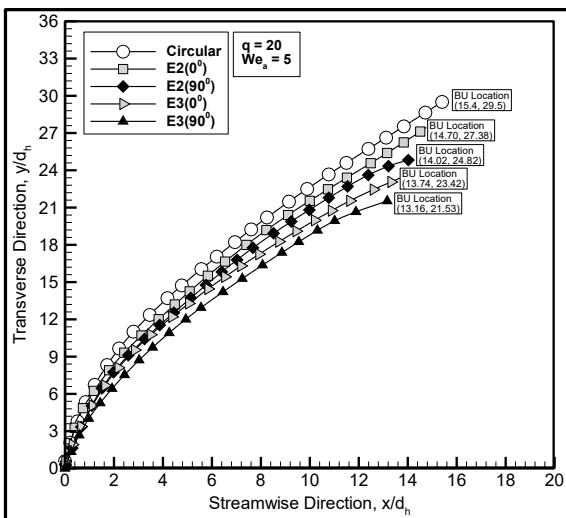


Fig. 3. Circular and elliptical liquid jet trajectories.

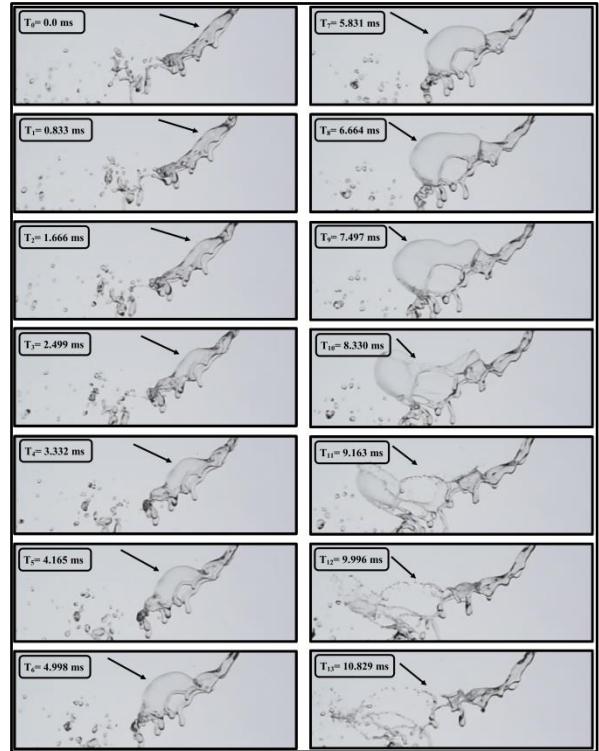


Fig. 4. Bag Formation and breakup Process.

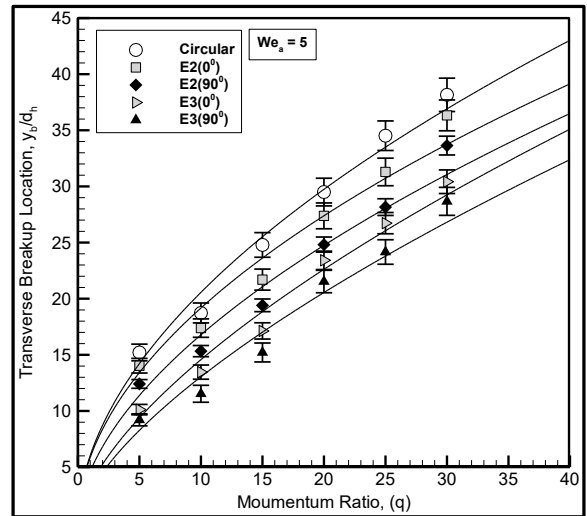


Fig. 5. Breakup location of circular and elliptical jets.

3.3. Column Breakup Location

As notable from the Fig. 5 circular jet penetrated more than the elliptical liquid jet. This may due to the elliptic jet is affected more by the aerodynamic forces and consequently the penetration of the elliptic jet is fewer than circular.

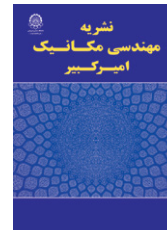
4. CONCLUSIONS

The main results of this paper can be summarized as follows: Elliptic jets curve more toward the air crossflow direction and even more than circular jet and also from

measured data at the same conditions, elliptic jets show less penetration than the circular jet especially when the major axis of the elliptical nozzles is placed perpendicular to the crossflow direction. This may be due to the fact that in this situation elliptical liquid jet has frontal area as flat shape and this causes the jet to be affected more by the aerodynamic drag force. In the elliptical liquid jets, the formation of the breakup regimes is at the low air Weber number. The size of the bags which are formed on the column of the elliptical jet, are bigger than the bags formed on the circular jet. The membrane of a bag grows more than its ring.

REFERENCES

- [1] N. Ashgriz, *Handbook of atomization and sprays: theory and applications*, Springer Science & Business Media, 2011.
- [2] M. Broumand, M. Birouk, *Liquid jet in a subsonic gaseous crossflow: Recent progress and remaining challenges*, *Progress in Energy and Combustion Science*, 57 (2016) 1-29.
- [3] J.A. Schetz, A. Padhye, *Penetration and breakup of liquids in subsonic airstreams*, *AIAA Journal*, 15(10) (1977) 1385-1390.
- [4] T. Chen, C. Smith, D. Schommer, A. Nejad, *Multi-zone behavior of transverse liquid jet in high-speed flow*, in: *31st Aerospace Sciences Meeting*, 1993, pp. 453.
- [5] P.-K. Wu, K.A. Kirkendall, R.P. Fuller, A.S. Nejad, *Breakup processes of liquid jets in subsonic crossflows*, *Journal of Propulsion and Power*, 13(1) (1997) 64-73.
- [6] M. Birouk, T. Stähler, B. Azzopardi, *An experimental study of liquid jets interacting with cross airflows*, *Particle Systems Characterization*, 20(1) (2003) 39-46.
- [7] S. Tambe, S.-M. Jeng, H. Mongia, G. Hsiao, *Liquid jets in subsonic crossflow*, in: *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2005, pp. 731.
- [8] Y. Song, D. Hwang, K. Ahn, *Effect of orifice geometry on spray characteristics of liquid jet in cross flow*, in: *55th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2017, pp. 1961.
- [9] X.-h. Wang, Y. Huang, S.-l. Wang, Z.-l. Liu, *Bag breakup of turbulent liquid jets in crossflows*, *AIAA Journal*, 50(6) (2012) 1360-1366.



مقایسه تجربی مشخصه‌های تزریق جت‌های آب دایروی و بیضوی در جریان جانبی هوا

یوسف رضائی*، مهرا تاج‌فر

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۶-۲۳
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۸-۲۱
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۹-۱۲
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۹-۲۹

کلمات کلیدی:

جریان جانبی
تزریق جت مایع
جت بیضوی
شکست ستون جت
مسیر جت

خلاصه: مشخصه‌های جریان جت‌های آب دایروی و بیضوی تزریق شده به درون جریان جانبی هوا به صورت تجربی بررسی شده است. دو انژکتور بیضوی با نسبت منظری‌های متفاوت و یک انژکتور دایروی با مساحت مقطع برابر به عنوان هندسه معیار مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. محور بزرگ انژکتورهای بیضوی در دو حالت موازی و عمود بر جهت جریان هوا قرار گرفته شده است. جت‌های مایع توسط تکنیک سایه‌نگاری آشکارسازی شده و وضعیت لحظه‌ای جت‌ها با بهره‌گیری از یک دوربین سرعت بالا ضبط و ثبت شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که برخی از مشخصه‌های جت تزریق شده به داخل جریان جانبی هوا مانند عمق نفوذ جت و مسیر جت مایع با تغییر شکل هندسه خروجی نازل تحت تاثیر قرار می‌گیرند. همچنین نتایج حاکی از آن است که جت‌های بیضوی به دلیل پایداری کمتر آن‌ها نسبت به جت دایروی، زودتر شکسته شده و نفوذ کمتری به درون جریان هوا می‌کنند. بطوری که ارتفاع شکست بی‌بعد جت دایروی ۲۹٫۵ و ارتفاع شکست بی‌بعد جت بیضوی با نسبت منظری ۳ زمانی که محور بزرگ آن عمود بر جهت جریان هوا قرار گرفته است، مقدار ۲۱٫۵۳ می‌باشد. در این مطالعه دو نوع مختلف از رژیم‌های شکست، رژیم شکست ستونی و رژیم شکست کیسه‌ای مشاهده شده است.

۱- مقدمه

مطالعه بر روی جریان جت متقاطع از حدود ۷۰ سال پیش تاکنون مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. در ابتدا این تحقیقات بر روی نحوه اختلاط دود و هوا در دودکش‌های نیروگاه‌های بزرگ آغاز شد. نوع خاصی از این نوع جریان را تحت عنوان تزریق جت مایع در جریان جانبی هوا^۱ می‌شناسند. تزریق جت مایع به صورت متقاطع به دلیل اتمیزاسیون مناسب و نرخ تبخیر بالا، یکی از پیشرفته‌ترین روش‌ها برای سیستم تزریق سوخت می‌باشد بطوری که کاربردهای بسیار زیادی در سیستم‌های تزریق سوخت موتورهای پیشرفته هواپیما دارد. از میان رایج‌ترین کاربردها در این زمینه می‌توان به سیستم تزریق سوخت محفظه احتراق توربین گاز، تزریق سوخت در پس‌سوزها و تزریق سوخت در موتورهای رم‌جت و اسکرم جت اشاره نمود [۱] و [۲]. راندمان و بازدهی این موتورها بستگی کامل

به پروسه‌های انتشار، اتمیزاسیون و تبخیر جت سوخت مایع تزریق شده دارد [۱]. این گستره کاربرد باعث شده است که محققان زیادی به پژوهش بر روی فیزیک تزریق مایع و شکست جت مایع بپردازند و از جنبه‌های گوناگون آن را مورد بررسی قرار دهند. فهم درست پدیده شکست و اثرپذیری آن از پارامترهای مختلف، عامل کلیدی در طراحی سیستم‌های تزریق جت و بهینه‌سازی آن در جهت متناسب با کاربری آن می‌باشد. بدین منظور شناخت فیزیک پایه و ساختارهای جت مایع تزریق شده در جریان جانبی هوا دارای اهمیت فراوانی است.

شکل ۱ شماتیکی از جت مایع تزریق شده در جریان جانبی هوا را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید زمانی که جت مایع به صورت عمودی در یک جریان جانبی هوا تزریق می‌شود، نیروی درگ آئرودینامیکی باعث می‌شود که ستون جت مایع به سمت جهت جریان هوا تغییر مسیر دهد [۳] و همچنین باعث به وجود آمدن

1 Liquid Jet in Crossflow (LJICF)

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



موج‌هایی بر روی سطح ستون مایع می‌شود. رشد این امواج باعث شکسته شدن ستون جت و تبدیل آن به لیگامنت^۱ و قطرات ریز می‌شود. در حقیقت به این فرآیند، فرآیند شکست ستون جت مایع گفته می‌شود [۴ و ۵]. لیگامنت‌های تولید شده در هنگام شکست ستون جت مایع در فرآیند دیگری به قطرات بسیار کوچک تبدیل می‌شوند که به آن رژیم شکست ثانویه گفته می‌شود. با افزایش ویر هوا (We_a)، موج‌های سطحی بر روی ستون مایع افزایش پیدا کرده و باعث می‌شوند که قطرات ریزی از قسمت پشت به سمت جریان هوای ستون مایع جدا بشوند. به این پدیده شکست سطحی جت مایع گفته می‌شود [۶]. لازم به ذکر است که قطرات تولید شده در فرآیند شکست سطحی کوچکتر از قطرات تولید شده در فرآیند شکست ستون جت مایع می‌باشند [۲].

افزایش روز افزون کاربرد تزریق جت مایع در جریان هوا باعث شده است که با وجود تحقیقات گسترده‌ای که تا به حال بر روی آن انجام شده است هنوز هم از موضوعات مهم در علم مکانیک سیالات به شمار آید و گروه‌های تحقیقاتی مختلفی به مطالعه آن پرداخته‌اند. تاکنون مطالعات زیادی به صورت تحلیلی، تجربی و عددی توسط محققان مختلف به منظور بررسی مشخصه‌های تزریق جت مایع در جریان جانبی هوا انجام شده است. برخی از مهم‌ترین مطالعات صورت گرفته بر روی تزریق جت مایع در جریان جانبی هوا به شرح زیر می‌باشد:

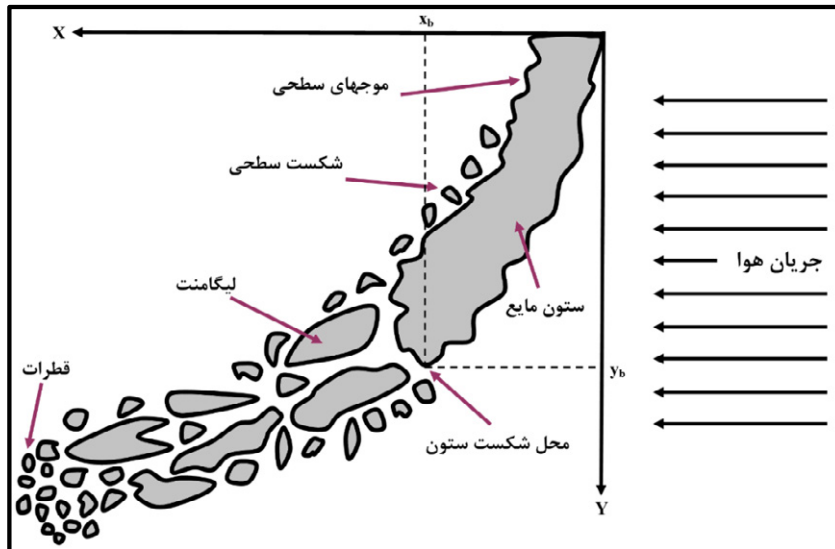
شتز و همکاران [۶] نشان دادند که بیشترین ارتفاع نفوذ جت تزریق شده فاصله‌ای است که ممنتوم جت مایع نیاز به تغییر جهت به سمت جریان جانبی هوا را دارد. چن و همکاران [۷] ناحیه تزریق جت مایع را به سه قسمت تقسیم‌بندی کردند: قسمت ستون مایع، قسمت لیگامنت‌ها و قسمت توده اسپری. همچنین یک معادله برای پیش‌بینی مسیر جت در این نواحی پیشنهاد دادند. رژیم‌های شکست جت مایع تزریق شده توسط وو و همکاران [۸] طبقه‌بندی شدند بطوری که آن‌ها طی یک مطالعه تجربی مشخصه‌های شکست و مسیر جت تزریق شده در جریان جانبی هوا را مورد بررسی قرار دادند و مشخصه‌های شکست جت مایع در جریان هوا را به دو رژیم اصلی: رژیم شکست ستونی و رژیم شکست سطحی بر اساس عدد ویر هوا و نسبت ممنتوم مایع به هوا، تقسیم‌بندی کردند. آن‌ها همچنین

1 Ligament

ناحیه شکست ستون جت مایع را به چهار زیر ناحیه، شکست ستونی، شکست کیسه‌ای، شکست ترکیبی و شکست برشی تقسیم‌بندی نمودند. در نهایت محل شکست ستون جت را شناسایی کردند و دریافتند که عمق نفوذ جت مایع تابعی از نسبت ممنتوم مایع به هوا می‌باشد. یوگان و همکاران [۹] نشان دادند که در نسبت ممنتوم‌های یکسان، افزایش قطر انژکتور سبب افزایش عمق نفوذ جت می‌شود و همچنین آن‌ها نشان دادند که برای انژکتور با قطر ثابت، افزایش نسبت ممنتوم به افزایش عمق نفوذ جت می‌انجامد و تمامی محققان دیگر نیز این نتایج را تایید می‌کنند.

برخی از محققان تاثیر ویژگی‌های مایع را بر روی مشخصه‌های جت تزریق شده در جریان هوا بررسی نموده‌اند. بیروک و همکاران [۱۰]، تاثیر تغییر ویسکوزیته جت مایع را بر روی رژیم‌های شکست اولیه مورد مطالعه قرار دادند آن‌ها متوجه شدند که ویسکوزیته مایع تاثیری روی مکانیزم‌های شکست جت تزریق شده در جریان هوا ندارد و همچنین آن‌ها نشان دادند که رابطه‌ای که توسط وو و همکاران [۸] برای پیش‌بینی مسیر جت پیشنهاد داده شده بود فقط برای مایعات با ویسکوزیته پایین بکار می‌رود و قادر به پیش‌بینی مسیر جت مایعات با ویسکوزیته بالا نیست. تمبه و همکاران [۵]، تاثیر کشش سطحی مایعات را بر روی رفتار ستون جت مورد بررسی قرار دادند، آن‌ها متوجه شدند که در رژیم شکست سطحی، مایعات با کشش سطحی پایین قطره‌های کوچکتری در نسبت با مایعات با کشش سطحی بالا تولید می‌شود و همچنین آن‌ها همانند وو و همکاران [۸]، متوجه دو نوع رژیم شکست شدند: شکست ستونی که در نسبت ممنتوم و ویر هوای پایین رخ می‌دهد و شکست سطحی که در نسبت ممنتوم و ویر هوای بالا اتفاق می‌افتد. استنزلر و همکاران [۱۱]، گزارش دادند که با افزایش ویسکوزیته جت مایع، ستون جت مایع تمایل بیشتری به خم شدن در جهت جریان هوا را دارد.

هندسه نازل یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر رفتار جت مایع تزریق شده است که هنوز بسیار از جنبه‌های آن مورد بررسی قرار نگرفته است. در میان تمامی پارامترهای هندسی یک نازل، هندسه خروجی نازل 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



شکل ۱: شماتیک جت مایع تزریق شده به درون جریان جانبی هوا.

Fig.1: Schematic of the injected liquid jet into an air crossflow.

می‌تواند شامل هندسه‌های سه گوش، مربع، مستطیل، بیضوی و غیره باشد که هر کدام دارای ویژگی‌های خاص خود هستند که باید یک به یک مورد مطالعه قرار بگیرند. جت‌های غیر دایروی باعث افزایش ناپایداری جت مایع شده و فرآیند شکست را تسریع می‌بخشند. از دیدگاه احتراقی، جت‌های غیردایروی باعث افزایش اختلاط سوخت شده و 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]. همان‌طور که پیشتر اشاره شد در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده برای تزریق جت مایع از انژکتور با هندسه دایروی استفاده نموده‌اند، یکی از پژوهش‌هایی که به تازگی توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است، بررسی تاثیر شکل هندسه خروجی انژکتور بر روی مشخصه‌های جت تزریق شده می‌باشد. در زمینه تزریق جت مایع غیردایروی به درون جریان هوا مطالعات بسیار کمی صورت گرفته است. سانگ و همکاران [۴] طی یک مطالعه تجربی تاثیرات هندسه خروجی انژکتور بر روی مشخصه‌های اسپری جت مایع در هوای ساکن و با جریان هوا بررسی نمودند. آن‌ها متوجه شدند که وقتی که محور بزرگ نازل بیضوی موازی با جهت جریان هوا قرار می‌گیرد، در این حالت جت مایع نفوذ بیشتری در جریان هوا می‌کند. جت بیضوی به صورت عددی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است که می‌توان به پژوهش اخیر فروردین و همکاران [۱۴] اشاره کرد که آن‌ها

شکست جت بیضوی در جریان هوا را بصورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها گزارش دادند که زمانی که محور بزرگ نازل بیضوی عمود بر جریان هوا قرار می‌گیرد با افزایش نسبت منطری نازل بیضوی، جت مایع بیشتر به سمت جهت هوا خم می‌شود و در نتیجه عمق نفوذ جت کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین متوجه شدند که جت مایع بیضوی با نسبت قطر بزرگتر از یک، زودتر از جت مایع دایروی شکسته می‌شود. تعدادی دیگر از مطالعات بر روی تزریق جت مایع غیردایروی در هوای ساکن نیز توسط محققان انجام شده است [۱۵ و ۱۶]. جابری و همکاران [۱۶] طی یک مطالعه تجربی بر روی تزریق جت‌های مایع بیضوی و مستطیلی به درون هوای ساکن نشان دادند که، جت‌های مایع بیضوی دارای پایداری کمتری نسبت به جت دایروی می‌باشد و همچنین جت مستطیلی پایداری مشابه با جت دایروی از خود بروز می‌دهد. پیشینه مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که هنوز مطالعه کاملی بر روی تزریق جت مایع از نازل‌های بیضوی صورت نگرفته و بنابراین مشخصه‌های آن نیاز به بررسی بیشتری دارد. در ادامه مطالعه تجربی جابری و همکاران [۱۶] که به بررسی مشخصه‌های جت‌های مایع بیضوی و مستطیلی تزریق شده به درون هوای ساکن (بدون جریان هوا) پرداختند و جت‌های مایع تزریق شده در محیط هوای ساکن را با یکدیگر مقایسه نمودند، در این مطالعه قصد داریم به بررسی و مقایسه جت‌های مایع دایروی و بیضوی تزریق شده به درون جریان جانبی هوا که فیزیک کاملاً متفاوتی نسبت به

مایع و همچنین تشکیل حباب در دورن مخزن از بین می‌رود. برای اندازه‌گیری دبی جریان آب از یک فلومتر که قادر به اندازه‌گیری دبی جریان بین ۴ تا ۴۰ لیتر بر ساعت را دارد استفاده شده است. در نهایت جت مایع توسط یک نازل که در قسمت بالایی اتاقک آزمون و در فاصله ۲۰۰ میلی‌متری از ورودی هوا به اتاقک آزمون نصب شده است، به داخل جریان هوا بصورت عمودی تزریق می‌شود. لازم به ذکر است که در این مطالعه از آب به عنوان جت مایع تزریق شونده استفاده شده است. شکل ۳ قسمت‌های مختلف سیستم تزریق مایع و نحوه قرارگیری آن‌ها را به صورت یک طرحواره به خوبی نشان می‌دهد.

۲-۳- انژکتورها

به منظور مقایسه بین هندسه‌های بیضوی و دایروی، دو انژکتور بیضوی با ضرایب منطری متفاوت و مساحت سطح خروجی یکسان ساخته شده است. همچنین از یک انژکتور دایروی با مساحت سطح خروجی برابر با دو انژکتور بیضوی، به عنوان هندسه مرجع استفاده شده است. به منظور جلوگیری از زنگ‌زدگی، انژکتورها از جنس فولاد ضد زنگ طراحی و ساخته شده‌اند. با توجه به ابعاد انژکتورها، از روش ماشین‌کاری برش سیم برای ایجاد هندسه مورد نظر با دقت بالا استفاده شد. جزئیات کامل هندسی انژکتورها در شکل ۴ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که حرف C، E1 و E2 به ترتیب مخفف انژکتورهای دایروی، انژکتور بیضوی با نسبت منطری ۲ و ۳ هستند. همان‌طور که در تصویر سمت راست شکل ۴ مشاهده می‌نمایید در این مطالعه $E(0^\circ)$ به این معنی است که محور بزرگ انژکتور بیضوی موازی با جهت جریان جانبی هوا قرار گرفته و $E(90^\circ)$ به این معنی است که محور بزرگ انژکتور بیضوی عمود به جهت جریان قرار گرفته است.

۲-۴- روش ثبت تصاویر

مشخصه‌های جت مایع تزریق شده با استفاده از روش سایه‌نگاری آشکارسازی شده است. با توجه به فرکانس بالای پدیده‌های حاضر در تزریق جت آب، نیاز به استفاده از دوربینی با توانایی عکسبرداری با سرعت بالا می‌باشد. بدین منظور از دوربین نیکون جی ۴-۱۴ استفاده شد که قادر به ثبت تصاویر با مدت زمان نورگیری $62/5^5$ میکروثانیه می‌باشد. همچنین این دوربین امکان تصویربرداری با سرعت ۱۲۰۰

تزریق در هوای ساکن دارد، پردازیم و برخی از مشخصه‌های جت‌های دایروی و بیضوی تزریق شده به دورن جریان جانبی هوا همچون: مسیر ستون جت مایع، محل شکست جت، رژیم‌های شکست اولیه و همچنین شکل‌گیری کیسه‌ها بر روی ستون جت‌ها را مورد بررسی قرار دهیم و مشخصه‌های جریان‌ها را به صورت کمی و کیفی تحلیل و مقایسه نماییم.

۲- تجهیزات تجربی، عکس‌برداری، پردازش تصویر و شرایط آزمایش

در این بخش به ترتیب به تجهیزات تجربی، روش عکسبرداری، پردازش تصویر و شرایط آزمایش پرداخته می‌شود. تجهیزات تجربی خود به سه قسمت اصلی به ترتیب تونل باد دو فازی، سیستم تزریق جت مایع و سیستم آشکارسازی جریان تقسیم‌بندی شده است.

۲-۱- تونل باد دو فازی

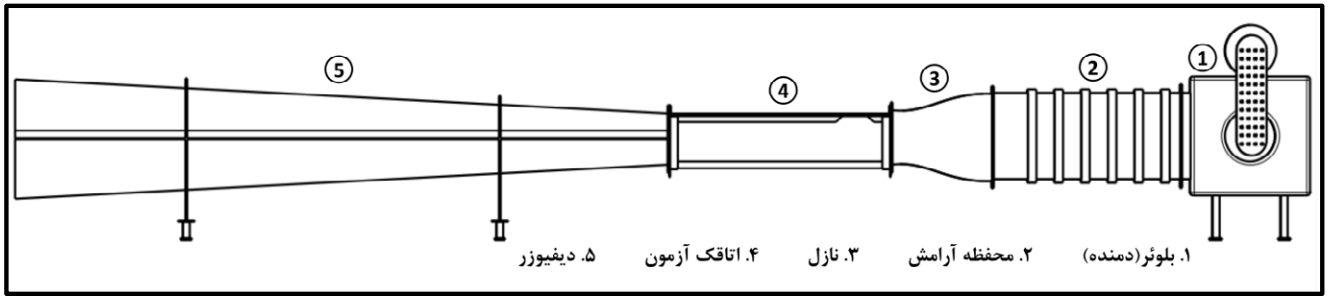
تونل باد دوفازی دانشگاه صنعتی امیرکبیر توانایی ایجاد جریان هوای یکنواخت در داخل اتاقک آزمون^۱ با دامنه سرعت بین ۰/۲ تا ۴۵ متر بر ثانیه را دارد. چندین صفحات لانه زنبوری^۲ در داخل محفظه آرامش^۳ تونل برای ایجاد جریان یکنواخت در داخل اتاقک آزمون، قرار داده شده است. به منظور آشکارسازی جریان جت مایع، دیواره‌های کناری اتاقک آزمون تونل باد با استفاده از شیشه‌های شفاف با سطح مقطع $0/3 \times 0/3$ مترمربع و با طول ۱/۳ متر ساخته شده است. شکل ۲ نقشه دوبعدی تونل باد دوفازی به همراه معرفی قسمت‌های مختلف آن را نشان می‌دهد.

۲-۲- سیستم تزریق جت مایع

سیستم تزریق مایع متشکل از کپسول نیتروژن پرفشار، مخزن مایع، فلومتر و انژکتور می‌باشد. مایع تست شونده در یک مخزن ذخیره و برای ایجاد جریان از زیر مخزن، مایع داخل مخزن توسط گاز نیتروژن تحت فشار قرار می‌گیرد. در درون مخزن مایع یک صفحه جداساز تعبیه شده و از برخورد مستقیم جریان گاز پر فشار با مایع جلوگیری می‌کند و احتمال هرگونه اختلاط ناخواسته بین گاز و

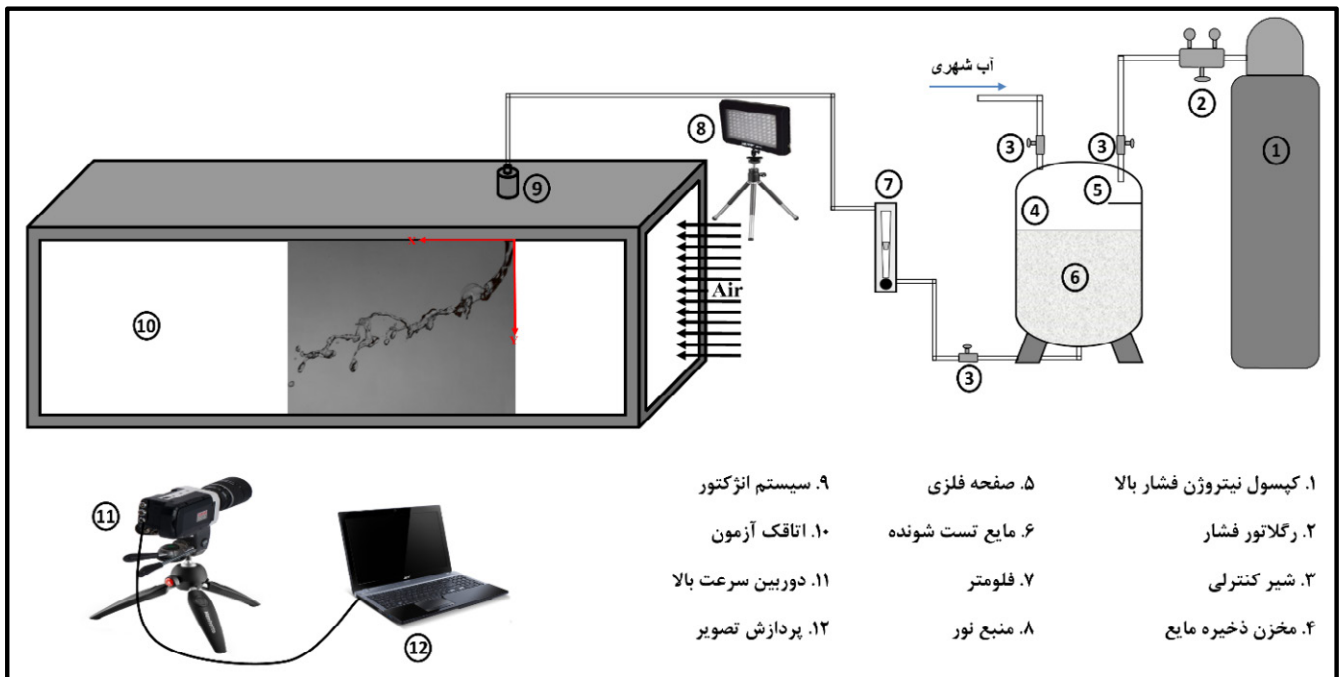
- 1 Test Section
- 2 Honeycombs
- 3 Settling Chamber

- 4 J4-1
- 5 Exposure Time



شکل ۲: طرح شماتیک تونل باد دوفازی.

Fig.2: Schematic of the wind tunnel.



شکل ۳: طرحواره تجهیزات تجربی و نحوه قرارگیری آن‌ها.

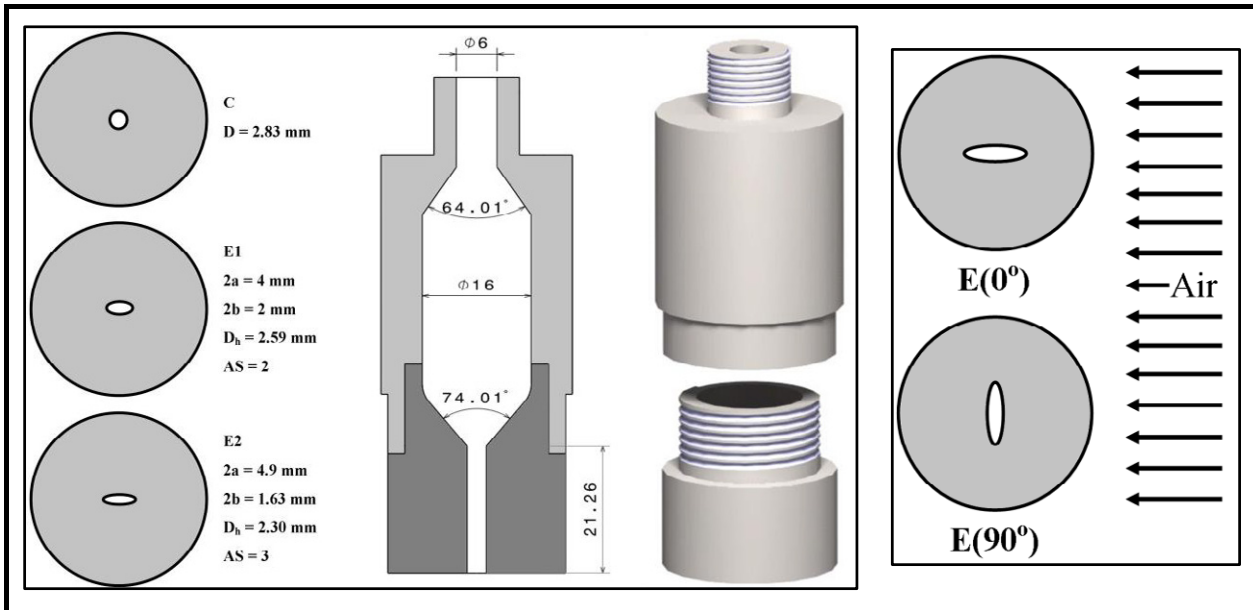
Fig.3: Schematic of the experimental setup and their placement.

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 آزمایشات، 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 ۵ راست) دریافت می‌شود و در اولین مرحله، ستون جت شناسایی شده و مرز سایه‌های آن از تصاویر پس‌زمینه جدا می‌شود (شکل ۵ وسط). در گام نهایی پروفیل اصلی ستون جت مشخص می‌شود. به کمک این

فریم بر ثانیه و با وضوح تصویر ۵۲۳۲×۳۴۸۸ را نیز مهیا می‌سازد. به منظور بهبود کیفیت تصاویر، دوربین به لنز نیکور ۳۰-۱۰ میلی‌متری با قابلیت بزرگنمایی ۳ برابر مجهز شده است. در هر شرایط آزمایش، بیش از ۶۰ عکسبرداری انجام شده و نتایج ارائه شده میانگین همه تصاویر ثبت شده می‌باشد.

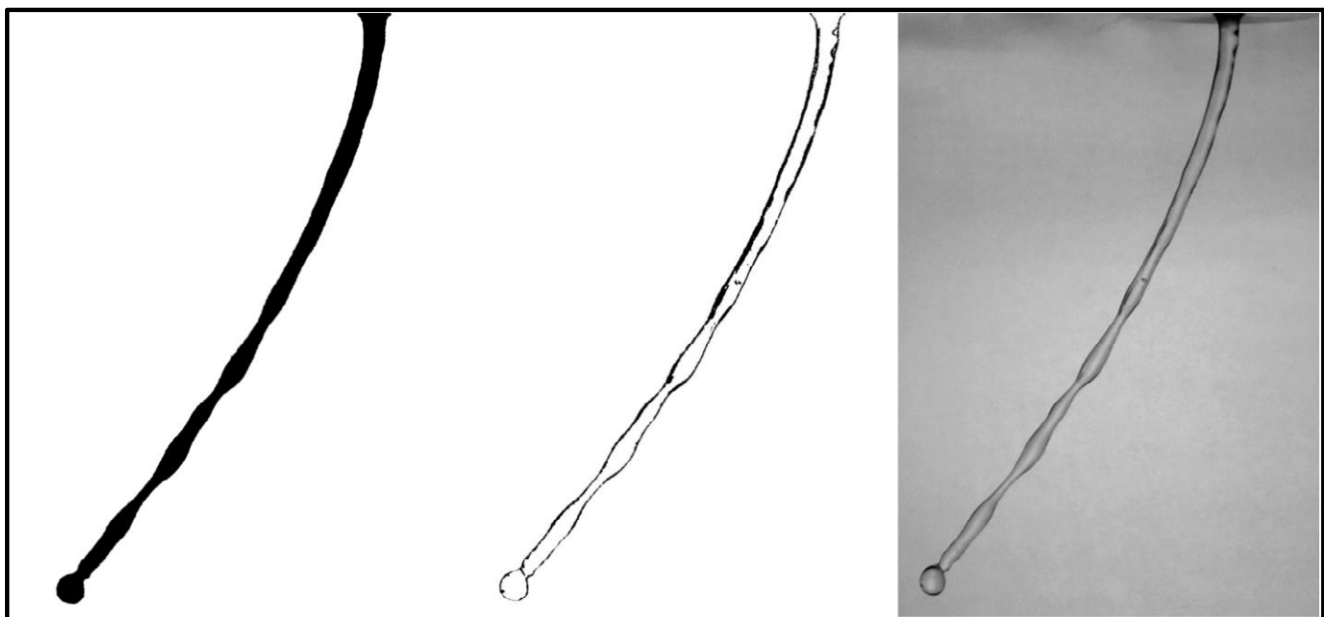
۵-۲- پردازش تصویر

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 نرم‌افزار تجاری متلب نوشته شد که امکان پردازش



شکل ۴: جزئیات هندسی انژکتورهای ساخته شده و نحوه قرارگیری آن‌ها.

Fig.4: Geometrical details of the nozzles.



شکل ۵- فرآیند پردازش تصویر. راست) تصویر اصلی، وسط) شناسایی مرزهای جت، چپ) پروفیل جت.

Fig. 5: Image processing procedure. Right) Original image, Middle) Boundaries of the liquid jet, Left) Profile of the liquid jet.

۶-۲- شرایط آزمایش

کیله آزمایشات در شرایط دمای اتاق و فشار اتمسفریک انجام شده است. در این مطالعه برای بررسی تاثیر تغییر وبر هوا در نسبت ممنتوم ثابت، سرعت جت مایع با تغییر سرعت هوا، به گونه تنظیم شده است که نسبت ممنتوم جت به هوا ثابت بماند و همچنین برای

پروفیل نهایی می توان پارامترهای مورد نیز از ستون جت همانند طول شکست، ارتفاع شکست، مسیر جت و غیره را به دست آورد. در آخر به کمک بعد فیزیکی به دست آمده در مسیر اول پردازش تصویر، تعداد پیکسل به دست آمده برای هر پارامتر به طول فیزیکی تبدیل می شود. فرآیند پردازش تصویر در شکل ۵ آورده شده است.

جدول ۱: خلاصه‌ای از شرایط آزمایش.

Table 1: Summary of test conditions.

پارامتر	آب	هوا
ρ (kg/m ³)	998	1/225
μ (N/m ²)	$8/02 \times 10^{-4}$	$1/73 \times 10^{-5}$
σ (N/m)	0/0728	-
V (m/s)	0/22-1/76	1-22
We	1/81-121	0/044-24/1
q	30-5	-

کمک بسزایی در شناخت رفتار جت باشد. چنان‌که اشاره شد، در این پژوهش پارامترهای متغیر هندسه انژکتور، عدد وبر هوا و جت می‌باشند. در شکل ۶ مقایسه بین ستون جت دایروی به عنوان هندسه مرجع با ستون جت مایع بیضوی در شرایط یکسان آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌نمایید، سطح ستون جت دایروی در سرعت‌های پایین به صورت صاف و تنها با موج‌های سطحی بسیار کم می‌باشد و با پایین آمدن جت، ناپایداری‌های ذاتی جریان به صورت موج‌های کوچکی رشد پیدا نموده و نهایتاً منجر به شکست ستون جت می‌شود. ولی در حالی‌که در شرایط یکسان سطح جت مایع بیضوی دارای نوسانات زیادتری نسبت به جت دایروی بوده که این باعث رشد بیشتر امواج روی سطح ستون جت بیضوی شده و در نهایت باعث زودتر شکسته شدن جت بیضوی نسبت به جت دایروی می‌شود [۱۶]. شکل ۶ مقایسه بین سطح ستون جت مایع دایروی با سطح ستون جت مایع بیضوی در شرایط یکسان آورده شده است. توجه کنید که $E3(0^\circ)$ و $E3(90^\circ)$ به معنی انژکتور بیضوی با نسبت منظری ۳ و به ترتیب در حالت موازی (شکل ۶ ب) و عمود (شکل ۶ ج) با جهت جریان هوا قرار گرفته است.

پدیده دیگری که در شکل فوق کاملاً مشهود است، پدیده تغییر محور که در جت بیضوی رخ داده است، می‌باشد. در حقیقت این پدیده زمانی رخ می‌دهد جت مایع از یک نازل غیر دایروی مانند مستطیلی یا بیضوی شکل تزریق می‌شود نیروی سطحی مایع تمایل به کاهش سطح جت و تغییر شکل هندسه جت به سمت دایروی را دارد بطوری‌که در طی این تغییر یک سرعت عرضی ایجاد می‌شود

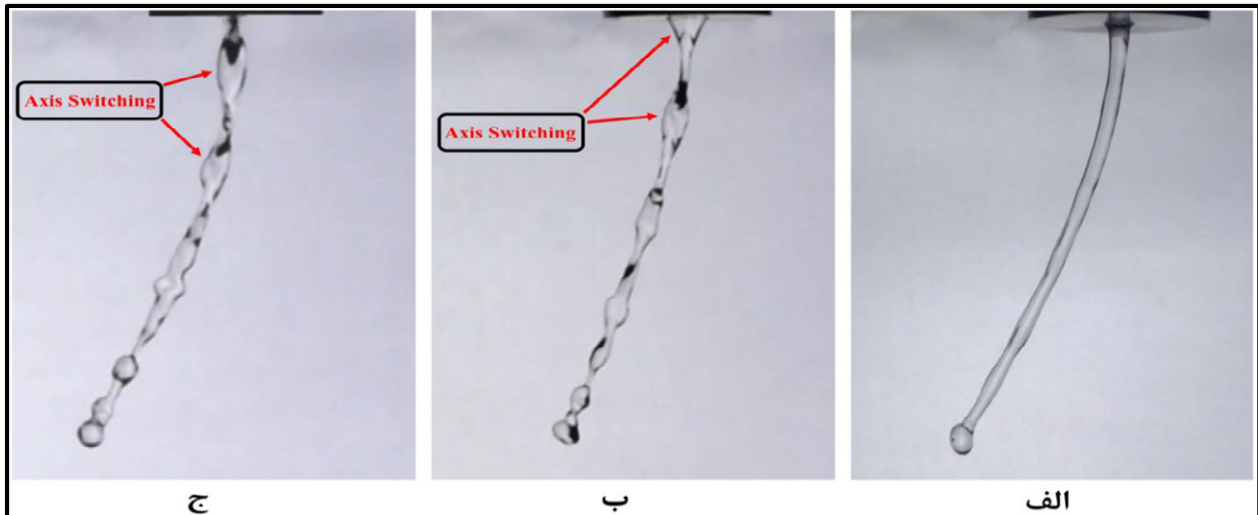
بررسی تاثیر تغییر نسبت ممنوم در شرایط وبر هوای یکسان، سرعت هوا ثابت نگه داشته شده و سرعت تزریق مایع تغییر می‌کند. سرعت تزریق مایع بین ۰/۲۲ تا ۱/۷۶ متر بر ثانیه و همچنین سرعت هوا بین ۱ تا ۲۲ متر بر ثانیه متغیر می‌باشد. برای یک نازل دایروی با قطر ۲/۸۳ میلی‌متر شرایط زیر آزمایش شده است: عدد وبر جت بین ۱/۸-۱۲۱، عدد وبر هوا بین ۰/۰۴-۲۴/۱ و نسبت ممنوم مایع به هوا بین ۵-۳۰ تغییر کرده است. که این محدوده آزمایشات باعث به وجود آمدن رژیم‌های شکست ستونی و شکست کیسه‌ای می‌شوند. شرایط آزمایش بطور خلاصه در جدول ۱ آورده شده است.

۳- نتایج و بحث

نتایج به دست آمده در چهار بخش ارائه می‌شود. ابتدا در قسمت آشکارسازی جریان تصاویر به دست آمده از جت‌های مختلف مورد تحلیل کیفی قرار می‌گیرند و سپس در بخش بعد به مقایسه بین مسیر حرکت جت‌های بیضوی و دایروی پرداخته می‌شود. در ادامه محل شکست جت‌های بیضوی و دایروی (طول و ارتفاع محل شکست) بررسی می‌شود. در بخش نهایی، به مقایسه بین اندازه کیسه‌های تشکیل شده بر روی جت‌های بیضوی و دایروی در رژیم شکست کیسه‌ای، به طور کامل پرداخته خواهد شد.

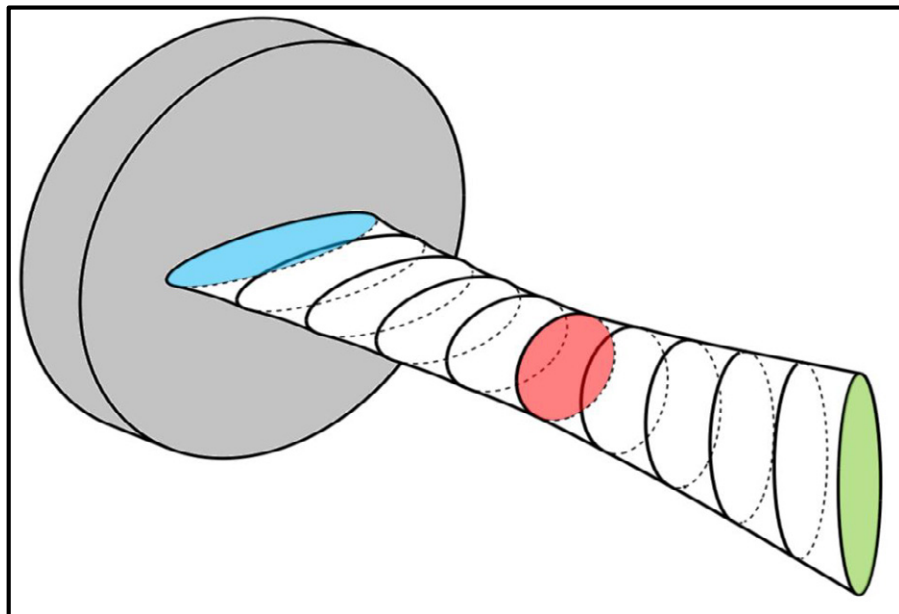
۳-۱- آشکارسازی جریان

تصاویر سایه‌نگاری به خوبی امکان بررسی شکل ظاهری ستون جت و تغییرات آن با پارامترهای مختلف را فراهم می‌کند که می‌تواند



شکل ۶: آشکارسازی جت‌های مایع دایروی و بیضوی تزریق شده در جریان هوا. وبر هوا $We_a = 2$ و نسبت ممنتوم $q = 15$ (الف) جت دایروی، (ب) جت بیضوی $E3(0^\circ)$ ، (ج) جت بیضوی $E3(90^\circ)$.

Fig.6: Visualization of circular and elliptical liquid jets. $We_a = 2$, $q = 15$. A) Circular jet, B) Elliptic jet “E3(0°)”, C) Elliptic jet “E3(90°)”.

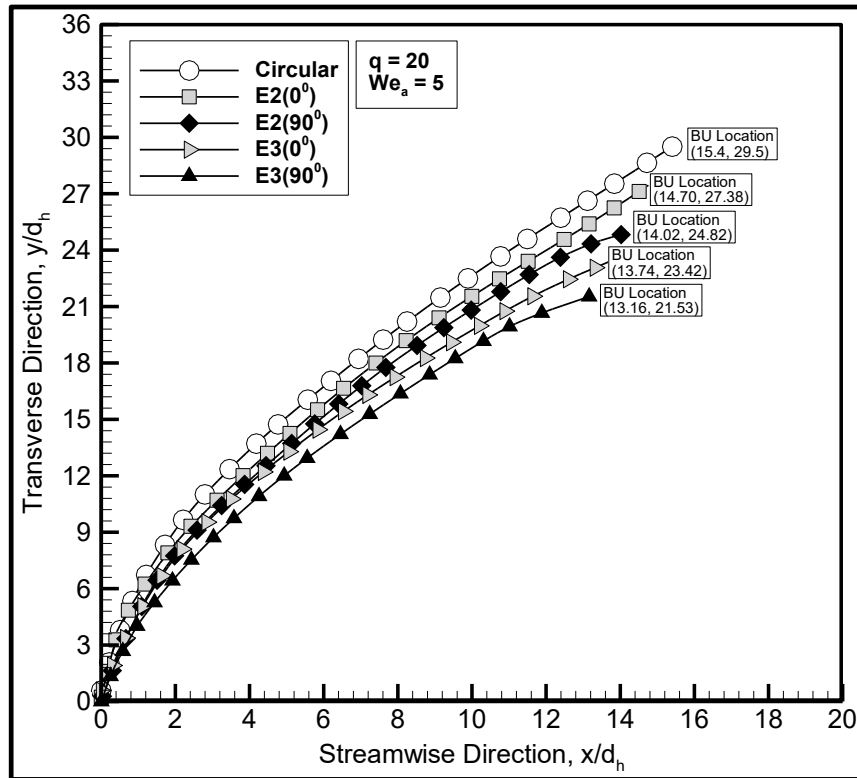


شکل ۷: طرحواره پدیده تغییر محور.

Fig. 7: Schematic of occurrence of the axis switching phenomenon.

سرعت‌های پایین، جت‌های غیر دایروی پس از طی مسافتی کوتاه، به شکل دایروی تبدیل می‌شوند. به این تغییر متوالی محورهای ستون جت بعد از تزریق از انژکتور پدیده تغییر محور نامیده می‌شود. تعداد دفعات تکرار تغییر محور به نسبت منظری نازل، هندسه نازل، لزجت مایع و سرعت جت بستگی دارد. پدیده تغییر محور بطور کامل و با

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 جابجا می‌شود. به همین دلیل در



شکل ۸: مقایسه مسیر ستون جت‌های دایروی و بیضوی.

Fig. 8: Comparison the trajectory of circular and elliptical liquid jets.

به جت تزریق شده از نازل دایروی، بیشتر به سمت جهت جریان هوا منحرف می‌شوند. یا به عبارت دیگر میزان خم شدن ستون جت‌های مایع بیضوی به سمت جریان هوا، نسبت به ستون جت مایع دایروی بیشتر می‌باشد به ویژه زمانی که محور بزرگ نازل بیضوی عمود بر جهت جریان هوا قرار گرفته شده است. همچنین نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که با افزایش نسبت منظری^۱ نازل‌های بیضوی، خمیدگی ستون جت‌های مایع تزریق شده از آن‌ها به سمت جریان هوا افزایش می‌یابد.

این پدیده حاکی از آن است که، زمانی که محور بزرگ نازل‌های بیضوی موازی با جهت جریان هوا قرار می‌گیرند یعنی به صورت $E(0^\circ)$ ، جت مایع تزریق شده از آن‌ها نیز در ابتدای تزریق به شکل بیضوی‌گون بوده و محور بزرگ جت مایع بیضوی تزریق شده نیز همانند نازل خود موازی با جهت جریان جانبی هوا می‌باشد. بدیهی است که در این حالت سطح تماس ستون جت مایع بیضوی با جریان جانبی هوا بسیار کم‌تر از سطح تماس ستون جت مایع دایروی

جزئیات بیشتر در مراجع [۱۵ و ۱۶] توضیح داده شده است. شکل ۷ پدیده تغییر محور را به صورت یک طرحواره نشان می‌دهد.

۳-۲- مقایسه مسیر ستون جت‌های دایروی و بیضوی

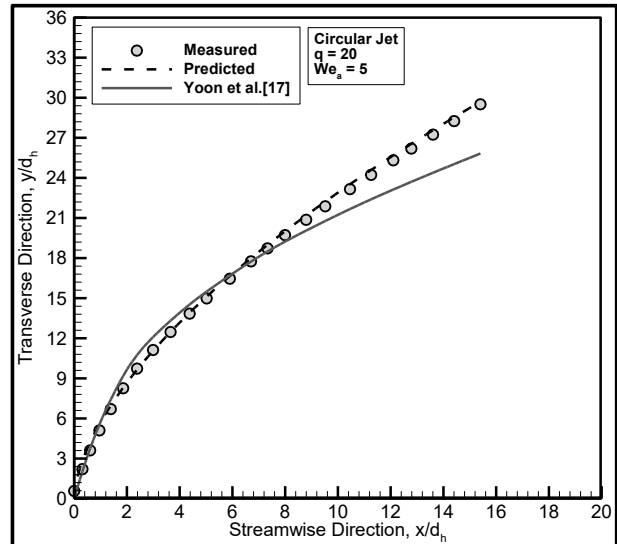
در این قسمت به مقایسه بین مسیر حرکت جت‌های تزریق شده از نازل‌های بیضوی که محور بزرگ آن‌ها در دو حالت موازی $E(0^\circ)$ و عمود $E(90^\circ)$ با جهت جریان هوا قرار گرفته است، می‌پردازیم. نتایج برای دو نازل بیضوی با نسبت منظری‌های ۲ و ۳ و همچنین یک نازل دایروی به عنوان هندسه مرجع آورده شده است. مسیرهای حرکت ستون جت‌های مایع در نمودار شکل ۸ نشان داده شده‌اند. مختصات کلیه مسیرها توسط قطر هیدرولیکی هر یک از نازل‌های بی‌بعد شده است. به منظور مقایسه هر یک از مسیر جت‌ها با یکدیگر، جت‌های بیضوی و دایروی در شرایط کاملاً یکسان (نسبت ممنتوم $q = 20$ و عدد وبر هوا $We_a = 5$) در جریان هوا تزریق شده‌اند.

همان‌طور که مشاهده می‌کنید نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که در شرایط یکسان، جت‌های تزریق شده از نازل‌های بیضوی نسبت

1 Aspect Ratio

گیرد که در این حالت تماس ستون جت با جریان هوا کاهش پیدا کرده ولی پس از ایجاد مجدد پدیده تغییر محور، دوباره محور بزرگ جت بیضوی عمود بر جریان هوا قرار گرفته و در نتیجه سطح تماس ستون جت با جریان هوا افزایش پیدا می‌کند. در نمودار شکل ۸ میزان خمیدگی جت‌های بیضوی و دایروی و همچنین اثر افزایش نسبت منظری نازل‌های بیضوی به وضوح قابل رویت می‌باشد. پر واضح است که افزایش نسبت منظری باعث بیشتر منحرف شدن جت بیضوی به سمت جریان هوا می‌شود. این نتایج با مشاهدات تجربی سانگ و همکاران [۴] و شبیه‌سازی عددی فروردین و همکاران [۱۴] کاملاً سازگار می‌باشند. زیرا هر دو نتایج مشابهی را در مورد این که جت مایع بیضوی بیشتر و زودتر به سمت جریان هوا منحرف می‌شود، را گزارش نموده‌اند. سانگ و همکاران [۴] طی یک مطالعه تجربی متوجه شدند که جت‌های بیضوی زودتر از جت دایروی به سمت جریان هوا خم می‌شود و این به دلیل سطح تماس بیشتر جت‌های بیضوی نسبت به جت دایروی می‌باشد. فروردین و همکاران [۱۴] نیز طی یک مطالعه عددی متوجه شدند که با افزایش نسبت بیضی‌گونه نازل بیضوی، جت‌های مایع تزریق شده از آن بیشتر به سمت جریان هوا خم می‌شوند.

در این مطالعه به منظور پیش‌بینی مسیر حرکت ستون جت مایعات، روابطی به فرم رابطه (۱) توسعه داده شده است. رابطه (۱) تابعی از نسبت ممنتوم و قطر نازل می‌باشد که با قرار دادن مختصات x و y اندازه‌گیری شده از تصاویر ستون جت و با استفاده از روش آماری رگرسیون غیرخطی ضرایب مجهول C ، α ، β محاسبه شده است. روابط بدست آمده توانایی پیش‌بینی مسیر ستون جت را در نسبت ممنتوم و اعداد وبر هوای مختلف با دقت بالایی را دارند بطوری که ضریب همبستگی^۱ روابط مسیر 0.974 و خطای قابل قبول^۲ روابط 0.205 می‌باشد. در نمودار شکل ۹ رابطه بدست آمده برای جت دایروی (هندسه مرجع) و همچنین داده‌های اندازه‌گیری شده از جت دایروی در کنار پژوهش دیگری [۱۷] جهت مقایسه ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌نمایید رابطه بدست آمده با دقت بالایی داده‌های اندازه‌گیری شده از مسیر جت را پیش‌بینی می‌کند (خط‌چین در شکل ۹) و هماهنگی خوبی با روابط محققان دیگر دارد. دلایل اصلی وجود اختلاف‌های جزئی بین روابط می‌توان به تجربی



شکل ۹: مقایسه بین داده‌های اندازه‌گیری شده از مسیر جت و رابطه پیش‌بینی آن.

Fig. 9: Comparison between measured and predicted data

می‌باشد در نتیجه نیروی درگ آئرویدینامیکی وارد شده به ستون جت بیضوی نیز به تبع آن کم‌تر از نیروی درگ آئرویدینامیکی وارد شده به ستون جت دایروی می‌باشد. اما همان‌طور که پیشتر توضیح داده شد جت‌های بیضوی که به صورت جت‌های غیر دایروی می‌باشند، پس از طی یک مسافت کوتاهی پس از تزریق در اثر ایجاد پدیده تغییر محور در ستون آن‌ها، محور بزرگ آن‌ها تغییر کرده و در نتیجه جت بیضوی که بصورت موازی در جریان هوا تزریق شده بود پس از پروسه پدیده تغییر محور، محور بزرگ آن‌ها تغییر نموده و این‌بار محور بزرگ جت بیضوی تزریق شده به صورت عمود بر جهت جریان هوا قرار می‌گیرد. اکنون در این حالت سطح تماس ستون جت بیضوی با جریان هوا به شدت افزایش یافته و مانند یک سطح پهن در مقابل جریان هوا قرار می‌گیرد بطوری که سطح تماسش حتی بیشتر از سطح تماس ستون جت دایروی نیز می‌شود. در نتیجه در این حالت نیروی درگ آئرویدینامیکی وارده شده بر ستون جت بیضوی افزایش یافته و باعث بیشتر منحرف شدن ستون جت‌های بیضوی به سمت جهت جریان هوا می‌شود. حال زمانی که محور بزرگ نازل‌های بیضوی عمود با جهت جریان هوا قرار می‌گیرند یعنی به صورت $E(90^\circ)$ جت مایع تزریق شده از آن‌ها در ابتدا سطح تماس زیادی با جریان هوا دارد که این خود باعث شده ستون جت بار اصلی نیروی درگ را متحمل شود، سپس پدیده تغییر محور باعث شده که محور بزرگ جت بیضوی پس از طی مسافتی از نقطه تزریق، تغییر کرده و موازی جریان هوا قرار

1 Correlation Coefficient

2 Standard Error

جدول ۲: ضرایب مجهول معادله مسیر جت‌ها.

Table 2: Coefficients of the trajectory correlation

نازل	α	β	C
C	0/490	0/603	1/316
E2(0°)	0/472	0/621	1/275
E2(90°)	0/404	0/722	1/227
E3(0°)	0/455	0/641	1/173
E3(90°)	0/380	0/753	1/127

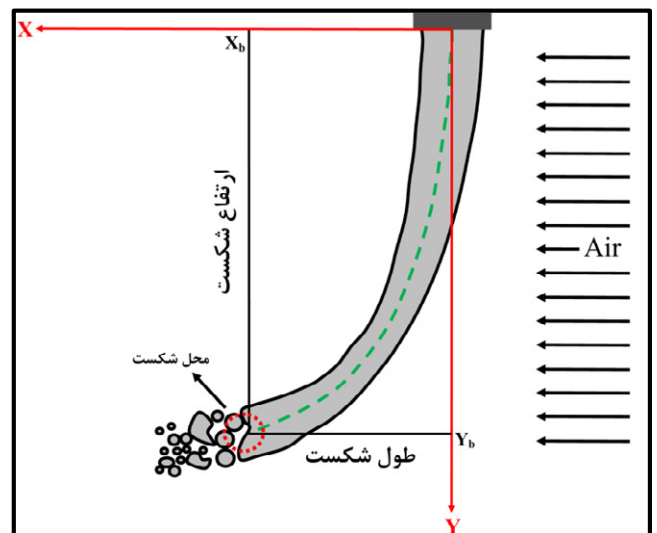
بودن پژوهش‌ها و روش‌های اندازه‌گیری متفاوت اشاره نمود.

۳-۳- محل شکست ستون جت‌های دایروی و بیضوی

در این قسمت به بررسی تاثیر نسبت ممنوم بر طول و ارتفاع محل شکست ستون جت‌ها و همچنین به مقایسه بین محل شکست جت‌های بیضوی و دایروی با یکدیگر، می‌پردازیم. شکل ۱۰ طول و ارتفاع محل شکست ستون جت مایع را نشان می‌دهد توجه داشته باشید که محور مختصات درست در نقطه تزریق جت قرار گرفته بنابراین اندازه‌گیری‌ها نسبت به آن نقطه صورت گرفته است. با توجه به این‌که شکسته شدن جت به دلیل ماهیت بسیار غیریکنواخت آن در یک نقطه ثابت رخ نمی‌دهد در نتیجه نتایج ارائه شده در این مطالعه میانگین ۶۰ عدد از تصاویر گرفته شده می‌باشد. همانند قسمت قبل نتایج برای دو نازل بیضوی با نسبت منطری‌های ۲ و ۳ و همچنین یک نازل دایروی به عنوان هندسه مرجع آورده شده است. مختصات کلیه نقاط توسط قطر هیدرولیکی هر یک از نازل‌ها بی‌بعد شده است. به منظور مقایسه محل شکست جت‌ها با یکدیگر، جت‌های بیضوی و دایروی در شرایط کاملاً یکسان و در عدد وبر هوا ثابت $We_a = 5$ آورده شده‌اند.

$$\frac{y}{d} = C q^\alpha \left(\frac{x}{d}\right)^\beta, \quad C = \sqrt{\frac{\pi}{c_d}} \quad (1)$$

در جدول ۲ کلیه ضرایب مجهول معادله مسیر (معادله (۱)) برای جت‌های بیضوی و دایروی و در هر دو شرایط $E(0^\circ)$ و $E(90^\circ)$ آورده شده است که با قرار دادن ضرایب مربوط به هر یک از جت‌ها در معادله (۱) رابطه مسیر هر یک از جت‌های بیضوی و دایروی بدست می‌آید. در نتیجه با داشتن رابطه هر یک از جت‌ها به راحتی می‌توان مسیر جت‌های تزریق شده را پیش‌بینی نمود.



شکل ۱۰: طول و ارتفاع محل شکست ستون جت مایع.

Fig. 10: Length and height of the breakup location.

۳-۳-۱ مقایسه ارتفاع محل شکست ستون جت‌های دایروی و بیضوی

در این قسمت به ارتفاع محل شکست ستون جت‌های تزریق شده از نازل‌های بیضوی که محور بزرگ آن‌ها در دو حالت موازی و عمود با جهت جریان هوا قرار گرفته است، می‌پردازیم. همان‌طور که در نمودارهای شکل ۱۱ مشخص است، نتایج حاکی از آن است که افزایش نسبت ممنوم جت به هوا، باعث افزایش ارتفاع شکست ستون جت‌ها شده یا به عبارت دیگر جت مایع بیشتر به درون جریان هوا نفوذ می‌کند و در نتیجه ارتفاع شکست جت افزایش می‌یابد [۸].

می‌باشد و پارامترهای دیگر نسبت به این دو پارامتر نقشی کم رنگ‌تر در تعیین نفوذ جت خواهند داشت [۲]. در این مطالعه نیز برای پیش‌بینی ارتفاع محل شکست جت مایعات، روابطی به فرم رابطه (۲) توسعه داده شده است. بدین منظور ضرایب n و k معادله زیر با استفاده از روش رگرسیون غیر خطی محاسبه شده و بهترین معادله خط منطبق بر این نقاط شکست بدست آمده است. روابط بدست آمده توانایی پیش‌بینی ارتفاع محل شکست جت را در نسبت ممنوم و اعداد و بره‌های مختلف با دقت بالایی را دارند. ضریب همبستگی روابط ارتفاع شکست جت‌ها ۰/۹۸۲ و خطای قابل قبول روابط ۰/۱۹۳ می‌باشد. فرم توانی معادله ارتفاع شکست به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{y_b}{d_h} = k q^n \quad (2)$$

در جدول ۳ کلیه ضرایب مجهول رابطه ارتفاع شکست برای جت‌های بیضوی و دایروی و در هر دو شرایط $E(0^\circ)$ و $E(90^\circ)$ آورده شده است که با قرار دادن ضرایب مربوط به هر یک از جت‌ها در رابطه (۲) ارتفاع شکست هر یک از جت‌های بیضوی و دایروی به راحتی قابل پیش‌بینی می‌باشد.

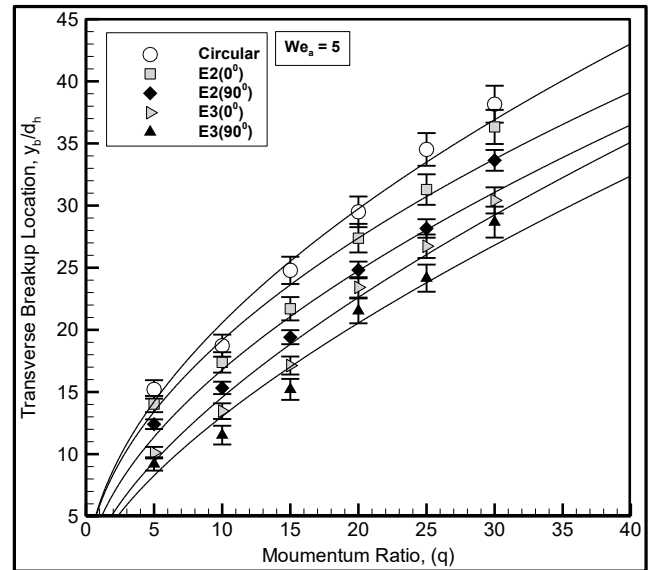
۳-۳-۲- مقایسه طول محل شکست ستون جت‌های دایروی و بیضوی

طول محل شکست ستون جت‌های تزریق شده از نازل‌های بیضوی نیز در نمودار شکل ۱۲ نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده افزایش نسبت ممنوم جت به هوا، تاثیری بر نسبت بی‌بعد طول شکست ستون جت‌ها (x_b/d) ، ندارد یا به عبارت دیگر طول شکست جت مایع نسبت به تغییر ممنوم تغییر چندانی نمی‌کند و دارای

جدول ۳: ضرایب مجهول رابطه ارتفاع شکست جت‌ها.

Table 3: Coefficients of the breakup height correlation.

n	k	نازل
0/538	5/92	C
0/542	5/35	E2(0°)
0/566	4/51	E2(90°)
0/639	3/31	E3(0°)
0/668	2/75	E3(90°)



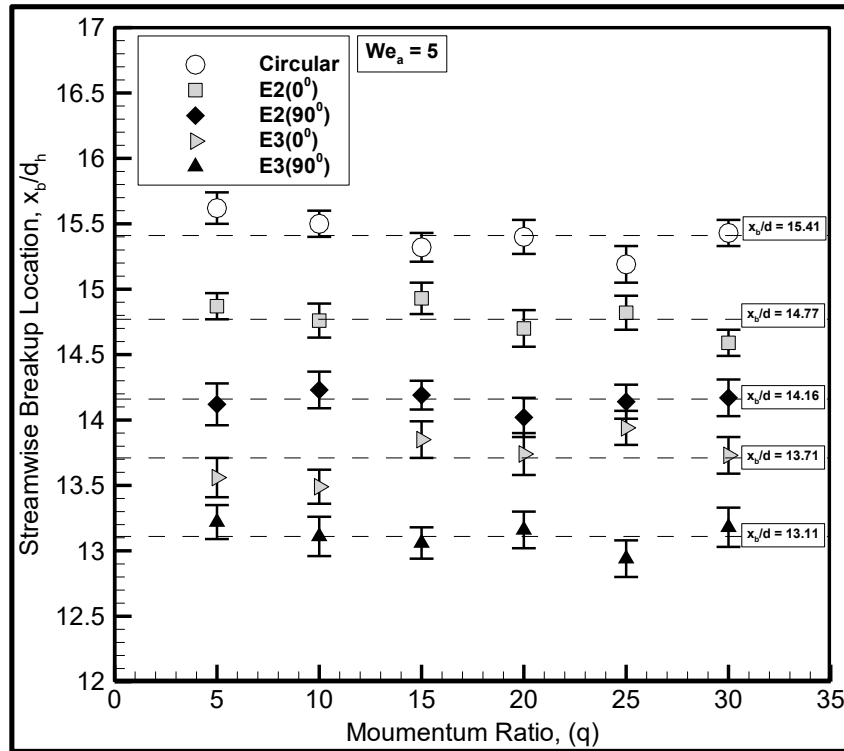
شکل ۱۱: مقایسه ارتفاع محل شکست ستون جت‌های دایروی و بیضوی.

Fig. 11: Comparison the breakup height of circular and elliptical jets.

نتیجه مهم دیگری که در مقایسه بین جت‌های بیضوی بدست آمده این است که، جت‌های بیضوی نسبت به جت دایروی زودتر شکسته می‌شوند و در نتیجه نفوذ آن‌ها به درون جریان هوا کمتر می‌باشد، به ویژه زمانی که محور بزرگ نازل بیضوی عمود بر جریان هوا قرار گرفته شده باشد [۴]. دو عامل مهم در کاهش نفوذ جت‌های بیضوی نسبت به جت دایروی به درون جریان هوا بسیار موثر می‌باشند. عامل اول همان‌طور که در قسمت مسیر حرکت جت‌ها توضیح داده شد، جت‌های بیضوی به دلیل سطح تماس بیشترشان با جریان هوا، بیشتر به سمت جریان هوا خم و یا منحرف می‌شوند که این خود باعث نفوذ کمتر جت به درون جریان هوا می‌شود زیرا بیشتر خم شدن ستون جت باعث کاهش ارتفاع محل شکست ستون جت می‌شود. عامل دوم همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شد سطح ستون جت‌های بیضوی به دلیل وجود پدیده تغییر محور دارای نوسانات زیادی نسبت به جت دایروی می‌باشد در نتیجه این نوسانات باعث تسریع در شکستن ستون جت می‌شوند. این دو عامل مهم‌ترین دلایل اصلی نفوذ کمتر جت‌های بیضوی نسبت به جت دایروی به درون جریان هوا می‌باشند.

در نمودار شکل ۱۱ همچنین اثر افزایش نسبت منظری نازل بیضوی به وضوح قابل رویت می‌باشد. پر واضح است که افزایش نسبت منظری باعث کاهش ارتفاع محل شکست جت بیضوی می‌شود.

در اکثر تحقیقات انجام شده نشان داده شده است که مهم‌ترین پارامتر در تعیین ارتفاع شکست جت، نسبت ممنوم و قطر انژکتور



شکل ۱۲: مقایسه طول محل شکست ستون جت‌های دایروی و بیضوی.

Fig. 12: Comparison the breakup length of circular and elliptical jets.

۳-۴- انواع رژیم‌های شکست

رژیم‌های شکست مختلفی در میدان جریان تزریق جت مایع در جریان جانبی هوا وجود دارد. رژیم‌های شکست عمدتاً توسط عدد وبر هوا پدیدار و کنترل می‌شوند. در مطالعه حاضر دو نوع مختلف از رژیم‌های شکست ستون جت مایع مشاهده شده است. که این رژیم‌ها عبارت‌اند از:

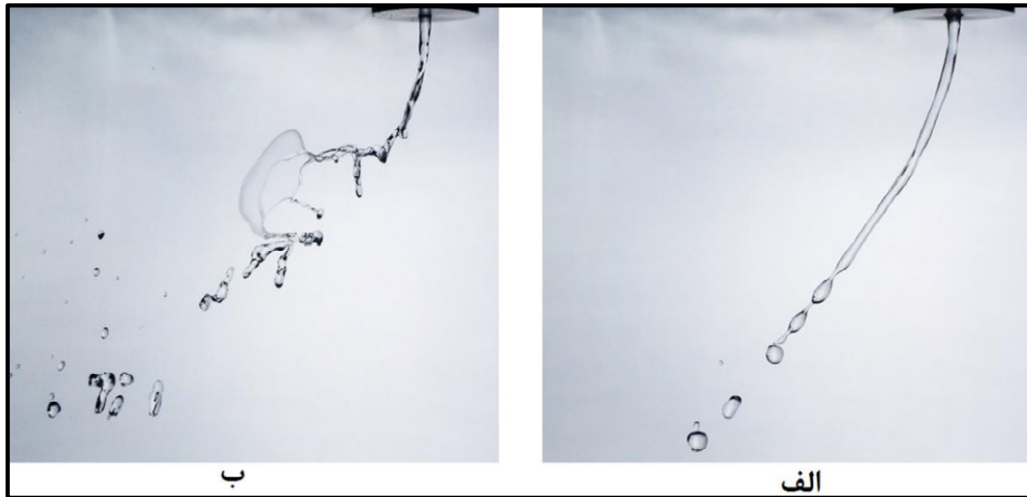
۱. رژیم شکست ستونی

۲. رژیم شکست کیسه‌ای

پس از تزریق جت مایع به درون جریان هوا، جت مایع به درون جریان هوا نفوذ کرده و جریان هوا سبب به وجود آمدن امواج بر روی سطح ستون جت تزریق شده می‌شود. رشد بیشتر این امواج سبب شکسته شدن ستون جت مایع و تبدیل آن به لیگامنت‌ها و قطرات بزرگ می‌شود. شکسته شدن جت مایع به لیگامنت‌ها اولین مرحله در شکست ستون جت بوده و به آن رژیم شکست ستونی گفته می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۳ الف) مشاهده می‌نمایید جت مایع پس از طی فاصله‌ای از نقطه تزریق شکسته شده و به تکه‌های کوچک به آن‌ها لیگامنت نیز گفته می‌شود، تبدیل شده است و خود

مقداری ثابت است و جت‌ها همواره در نسبت ممنتوم‌های مختلف در فاصله طول ثابتی از نقطه تزریق شکسته می‌شوند. نتیجه مشابهی توسط وو و همکاران [۸] در رابطه با ثابت بودن طول شکست جت مایع نسبت به تغییرات ممنتوم، گزارش شده است.

نتیجه مهم دیگری که در مقایسه بین جت‌های بیضوی بدست آمده این است که، جت‌های بیضوی نسبت به جت دایروی در فاصله طولی کمتر نسبت به محل تزریق شکسته شده‌اند و همچنین با افزایش نسبت منطری جت‌های بیضوی طول محل شکست ستون جت کاهش می‌یابد یا به عبارت دیگر با افزایش نسبت منطری جت‌های بیضوی نفوذ جت در جهت جریان هوا کاهش می‌یابد. عامل اصلی که در شکست زود هنگام جت‌های بیضوی نسبت به جت دایروی نقش دارد همین وجود نوسانات زیاد بر روی سطح جت‌های بیضوی می‌باشد. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد سطح ستون جت‌های بیضوی به دلیل وجود پدیده تغییر محور دارای نوسانات زیادی نسبت به جت دایروی می‌باشد در نتیجه این نوسانات باعث تسریع در شکستن ستون جت می‌شوند. مقادیر میانگین طول محل شکست جت‌ها در نمودار شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۳: دو نوع متفاوت از رژیم‌های شکست. الف) رژیم شکست ستونی، ب) رژیم شکست کیسه‌ای.

Fig 13: Two different mode of breakup regimes. A) Column breakup regime, B) Bag breakup regime.

رسیدن وبر هوا به عدد ۷ شاهد وجود رژیم شکست کیسه‌ای نبودیم. دسته‌بندی رژیم‌های شکست توسط محققان مختلف به صورت‌های متفاوتی انجام گرفته است. یک وجه اشتراکی که در بین تمامی این دسته بندی‌ها در نظر گرفته شده شکست ستونی و کیسه‌ای در بین آنها می‌باشد. در میان نتایج ارائه شده نتایج متفاوتی از تقسیم‌بندی‌های انواع شکست بر اساس عدد وبر هوا مشاهده می‌شود که می‌تواند به علت روش‌های متفاوت اندازه‌گیری باشد [۲]. در جدول ۴ محدوده وقوع رژیم‌های شکست مشاهده شده در این مطالعه آورده شده است.

۵-۳- رژیم شکست کیسه‌ای

همان‌طور که پیشتر اشاره شد با افزایش وبر هوا رژیم شکست ستونی جت تغییر نموده و وارد رژیم شکست کیسه‌ای می‌شود. بطوری که فشار دینامیکی اعمال شده بر ستون جت توسط جریان هوا بیشتر شده و سبب پهن شدن ستون جت در راستای عرضی می‌شود. در حقیقت پهن شدن ستون جت مایع در اثر توزیع غیر یکسان فشار دینامیکی وارد شده بر طرفین ستون جت می‌باشد [۱۸]. پهن‌شدگی ستون جت باعث شده که پروفیل ستون جت نازک‌تر شده و به شکل صفحه‌ای تخت تغییر شکل دهد که این باعث به وجود آمدن یک لایه توخالی از سیال به شکل کیسه‌هایی بر روی سطح ستون مایع می‌شود، این کیسه‌ها در جهت جریان هوا رشد نموده تا حدی که پوسته خارجی کیسه نازک و نازک‌تر شده تا زمانی که کشش سطحی

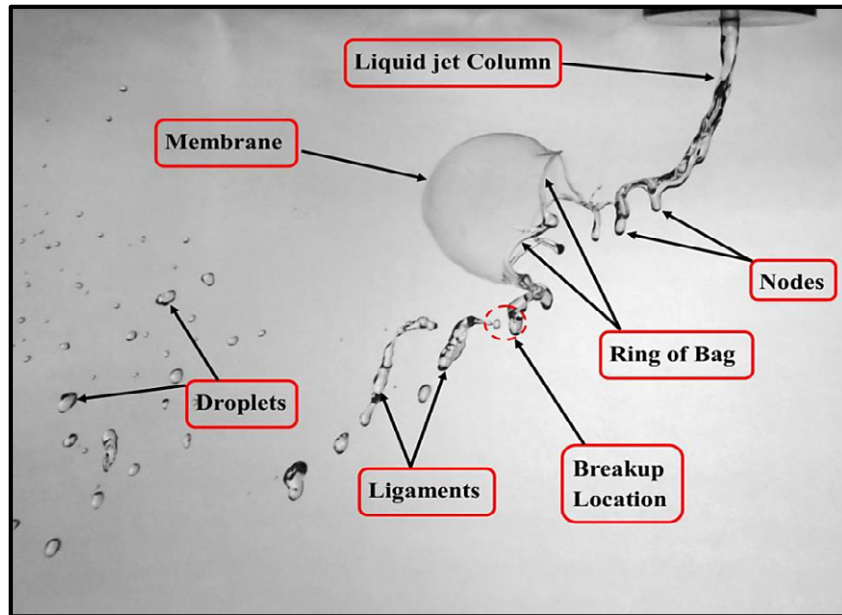
لیگامنت‌ها نیز بطور مجدد شکسته شده و قطرات کوچک‌تری تبدیل می‌شوند. شکل ۱۳ تصویری از دو نوع مختلف از رژیم‌های شکست ستون جت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌نمایید در عدد وبرهای هوای پایین، ستون جت مایع تنها شکست ستونی را متحمل می‌شود و رژیم جت مایع در این حالت رژیم شکست ستونی می‌باشد با افزایش وبر هوا کیسه‌هایی بر روی سطح ستون مایع نمایان می‌شود و ستون جت متحمل شکست کیسه‌ای شده و رژیم جریان جت مایع در این حالت رژیم شکست کیسه‌ای می‌باشد [۸].

در این مطالعه مشاهده شد که جت‌های بیضوی زودتر وارد رژیم شکست کیسه‌ای می‌شوند یا عبارت دیگر رژیم شکست کیسه‌ای در جت‌های بیضوی در وبرهای هوای پایین‌تری نسبت به جت دایروی رخ می‌دهد. به ویژه زمانی که محور بزرگ نازل بیضوی موازی با جهت جریان جانبی هوا قرار گرفته است زیرا رژیم شکست کیسه‌ای در وبر هوای پایین پدیدار شد. در حالی که برای جت دایروی تا قبل از

جدول ۴: رژیم‌های شکست و محدوده آنها.

Table 4: Breakup regimes and ranges

نازل / پژوهشگر	شکست ستونی	شکست کیسه‌ای
C	$We_a < \gamma$	$\gamma < We_a$
E2(0°)	$We_a < \delta$	$\delta < We_a$
E2(90°)	$We_a < \epsilon$	$\epsilon < We_a$
E3(0°)	$We_a < \epsilon/\gamma$	$\epsilon/\gamma < We_a$
E3(90°)	$We_a < \delta/\lambda$	$\delta/\lambda < We_a$



شکل ۱۴: معرفی قسمت‌های مختلف ستون جت در رژیم شکست کیسه‌ای.

Fig.14: Different parts of the liquid column in the bag breakup regime.

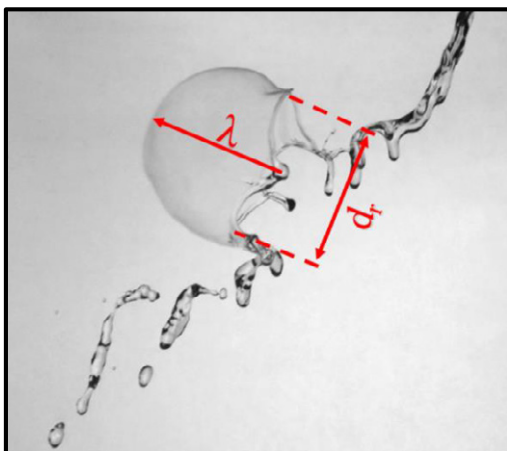
حلقه کیسه با حرف d_p مشخص شده است. نمودارهای شکل ۱۶ اندازه پوسته و قطر حلقه کیسه‌های تشکیل شده بر روی ستون جت‌های بیضوی و دایروی را نشان می‌دهند. بر اساس مشاهدات تجربی و همچنین محاسبات صورت گرفته، نتایج حاکی از آن است که اندازه پوسته و قطر حلقه کیسه‌ها با افزایش نسبت ممنتوم جت به هوا تغییر نکرده و تقریباً دارای مقداری ثابت می‌باشد یا به عبارتی دیگر اندازه و رشد کیسه‌ها به مقدار نسبت ممنتوم حساس نمی‌باشد. نتیجه مشابهی توسط وانگ و همکاران

جت مایع توانایی نگه داشتن آن را نداشته و در نهایت کیسه‌ها ترکیده یا شکسته شده و به قطرات ریزی تبدیل می‌شوند. به این پروسه، رژیم شکست کیسه‌ای ستون مایع گفته می‌شود [۱۸]. کیسه تشکیل شده بر روی یک ستون جت از سه بخش اصلی تشکیل می‌شود که شامل گره^۱، حلقه^۲ و پوسته^۳ می‌باشد. شکل ۱۴ نوعی از کیسه تشکیل شده بر روی ستون جت و بخش‌های مختلف آن را نشان می‌دهد.

در این مطالعه پارامترهای مختلفی همچون اندازه پوسته و قطر حلقه کیسه‌های تشکیل شده بر روی ستون جت‌های بیضوی و دایروی محاسبه و با یکدیگر مقایسه گردیده است. همچنین رشد کیسه‌ها در زمان نیز مورد بررسی قرار گرفته شده است. در ادامه به نتایج بدست آمده هر یک بطور مفصل بررسی خواهد شد.

۱-۵-۳- مقایسه اندازه پوسته و قطر حلقه کیسه‌ها

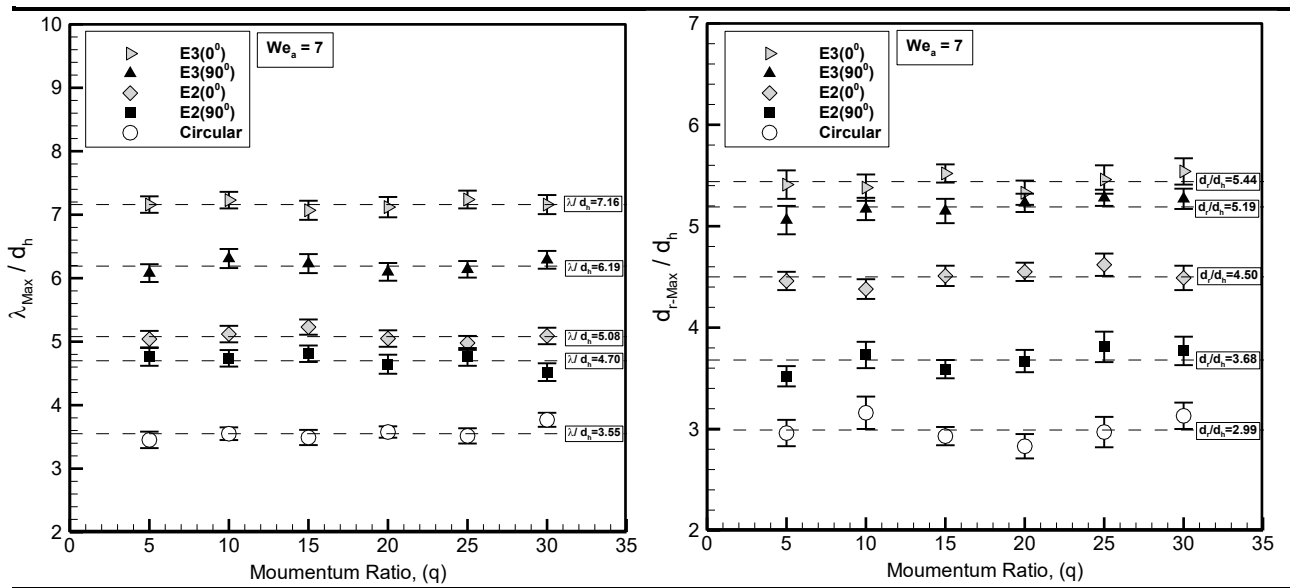
در این قسمت به مقایسه بین اندازه پوسته و قطر حلقه کیسه‌های تشکیل شده بر روی ستون جت‌های دایروی و بیضوی در رژیم شکست کیسه‌ای پرداخته می‌شود. توجه داشته باشید که همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌کنید اندازه پوسته کیسه با حرف λ و اندازه قطر



شکل ۱۵: پوسته و قطر حلقه یک کیسه.

Fig. 15: Membrane and ring of an established bag.

- 1 Node
- 2 Ring
- 3 Membrane



شکل ۱۶: مقایسه اندازه پوسته و قطر حلقه کیسه‌ها.

Fig. 16: Comparison the size of the membrane and the ring of the bags.

اندازه پوسته و قطر حلقه کیسه‌ها در حین رشدشان نسبت به زمان اندازه‌گیری شده است. نمودارهای شکل ۱۸ اندازه پوسته و قطر حلقه کیسه‌ها در حین رشدشان نسبت به زمان برای مدت ۷ میلی‌ثانیه نشان می‌دهند. چنانچه در قسمت قبل توضیح داده شد اندازه پوسته کیسه‌های جت‌های بیضوی نسبت به کیسه جت دایروی، بزرگتر می‌باشد و دلیل آن سطح تماس بیشتر جت‌های بیضوی می‌باشد. در این قسمت نیز نتایج حاکی از آن است که در زمان‌های مختلف نیز اندازه کیسه‌های تشکیل شده بر ستون جت‌های بیضوی بزرگتر از جت دایروی می‌باشد.

در شکل ۱۹ مقایسه بین رشد اندازه پوسته و قطر حلقه یک کیسه نسبت به زمان، برای جت دایروی آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌نمایید اندازه پوسته یک کیسه در زمان‌های مختلف بیشتر از قطر حلقه خود می‌باشد. به عبارت دیگر پوسته یک کیسه رشد بیشتری نسبت به قطر حلقه خود می‌کند. دلیل اصلی آن این است که در حقیقت کیسه‌های تشکیل شده به صورت کروی شکل نبوده و به سمت جریان هوا کشیده می‌شوند و این کشیدگی باعث شده اندازه پوسته یک کیسه بزرگتر از قطر حلقه خود باشد.

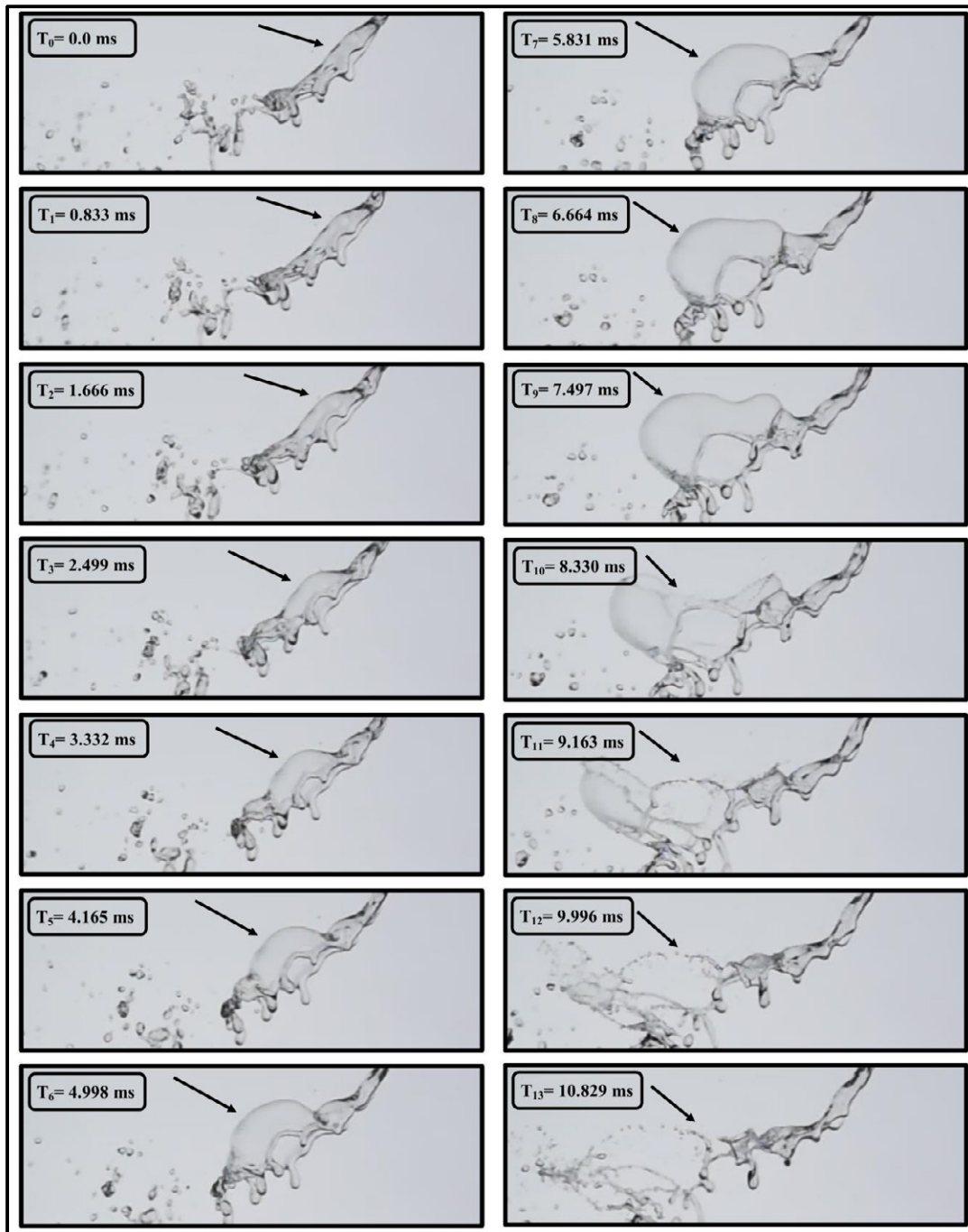
۴- نتیجه‌گیری

مشخصه‌های جریان جت‌های آب دایروی و بیضوی تزریق شده

[۱۹] در رابطه با مستقل بودن اندازه کیسه‌ها از نسبت ممنتوم جت به هوا، گزارش شده است. همچنین نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که اندازه پوسته و قطر حلقه کیسه‌های تشکیل شده بر روی سطح ستون جت‌های بیضوی بزرگتر از کیسه‌های جت دایروی می‌باشد یا به عبارت دیگر کیسه‌های جت‌های بیضوی رشد بیشتری نسبت به جت دایروی می‌کنند به ویژه زمانی که جت بیضوی به صورت $E(0^\circ)$ به درون جریان هوا تزریق شود. زیرا در این حالت در ابتدای تزریق محور بزرگ جت بیضوی موازی جریان هوا بود و سطح تماس ستون جت با هوا بسیار کم می‌باشد اما پس از طی مسافتی از نقطه تزریق در اثر پدیده تغییر محور، محور بزرگ جت مایع بیضوی تغییر نموده و بصورت عمود با جریان هوا قرار می‌گیرد اکنون در این حالت سطح تماس ستون جت با جریان هوا تشدید یافته و در نتیجه باعث به وجود آمدن کیسه‌های بزرگتری نسبت به جت دایروی می‌شود.

۲-۵-۳- رشد پوسته و قطر حلقه کیسه‌ها در زمان

در این مطالعه اندازه رشد پوسته و قطر حلقه کیسه‌ها در زمان نیز مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۷ فرآیند شکل‌گیری و متلاشی شدن یک کیسه نسبت به زمان را بطور کامل برای مدت زمان ۱۰/۸۲۹ میلی‌ثانیه نشان می‌دهد. توجه داشته باشید که هر یک از این تصاویر با فاصله ۰/۸۳۳ میلی‌ثانیه از هم می‌باشند.

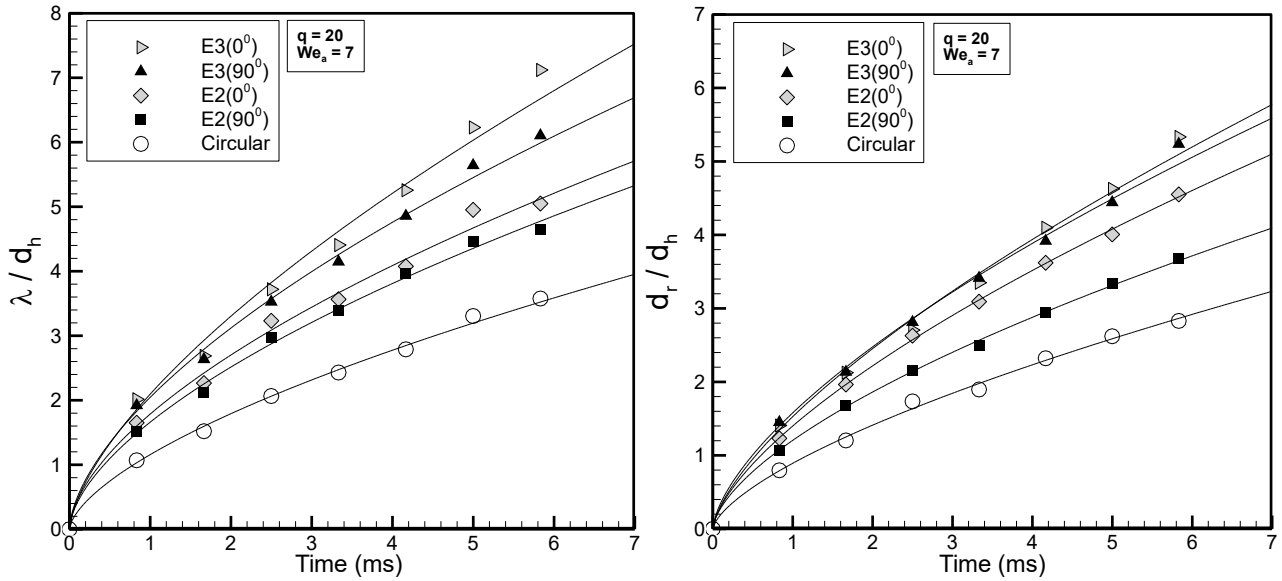


شکل ۱۷: فرآیند شکل‌گیری و ترکیدن کیسه‌ها در رژیم شکست کیسه‌ای.

Fig.17: Bag formation and breakup process in the bag breakup regime.

جریان هوا قرار گرفته شده است. جت‌های مایع توسط تکنیک سایه‌نگاری آشکارسازی شده و وضعیت لحظه‌ای جت‌ها با استفاده از یک دوربین سرعت بالا ضبط و ثبت گردیده است. با استفاده از تصاویر آشکارسازی جریان، رفتار فیزیکی جت‌ها در سرعت‌های برابر بررسی و باهم مقایسه شده است. بر اساس مشاهدات صورت گرفته، جت‌های

به درون جریان جانبی هوا به صورت تجربی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. به منظور مطالعه رفتار جت‌های بیضوی از دو نازل بیضوی با نسبت منطری‌های ۲ و ۳ و همچنین یک نازل دایروی به عنوان هندسه مرجع با مساحت‌های خروجی یکسان استفاده شده است. محور بزرگ نازل‌های بیضوی در دو حالت موازی و عمود بر جهت



شکل ۱۸: مقایسه رشد اندازه پوسته و قطر حلقه کیسه در زمان.

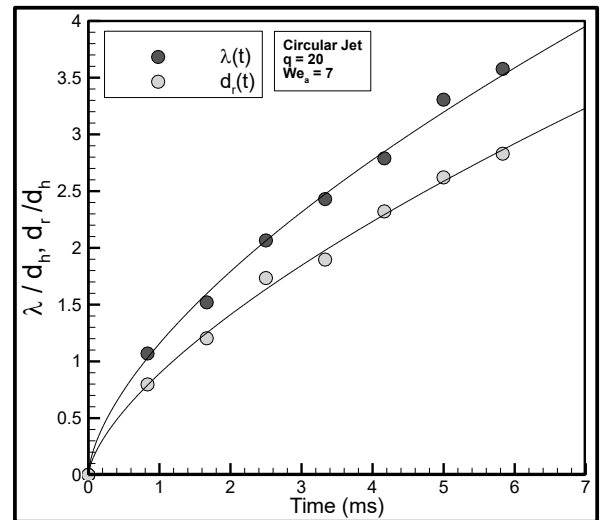
Fig. 18: Comparison of growing the size of the membrane and the ring of the bags in time.

هوا خم می‌شوند و افزایش نسبت منظری نازل‌های بیضوی باعث خمیدگی بیشتر جت‌ها می‌شود. ستون جت‌های بیضوی به دلیل خمیدگی بیشتر و همچنین وجود ناپایداری‌ها زودتر از جت دایروی شکسته شده و نفوذ کمتری به درون جریان هوا می‌کنند. بطوری‌که ارتفاع شکست بی‌بعد جت دایروی ۲۹/۵ و ارتفاع شکست بی‌بعد جت بیضوی با نسبت منظری ۳ زمانی‌که محور بزرگ آن عمود بر جهت جریان هوا قرار گرفته، مقدار ۲۱/۵۳ می‌باشد. در رژیم شکست کیسه‌ای اندازه کیسه‌های تشکیل شده بر روی ستون جت‌های بیضوی بزرگ‌تر از کیسه‌های جت دایروی می‌باشد زیرا میانگین اندازه بی‌بعد شده پوسته و قطر حلقه کیسه‌های جت بیضوی با نسبت منظری ۳ به ترتیب ۷/۱۶ و ۵/۴۴ بوده در حالی‌که میانگین اندازه بی‌بعد شده پوسته و قطر حلقه کیسه‌های جت دایروی ۳/۵۵ و ۲/۹۹ می‌باشد. بر مبنای نتایج بدست آمده از جت‌ها، رابطه‌ای تجربی برای تخمین مسیر و محل شکست ستون جت ارائه شده است.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

نیم طول محور بزرگ بیضی، mm	a
نیم طول محور کوچک بیضی، mm	b
قطر خروجی نازل، mm	d



شکل ۱۹: مقایسه اندازه رشد پوسته و قطر حلقه کیسه.

Fig. 19: Comparison the size of the membrane and the ring of the bags in time

بیضوی پایداری کمتری نسبت به جت دایروی از خود بروز می‌دهد. همچنین مشاهده شد که جت‌های بیضوی زودتر از جت دایروی وارد رژیم شکست کیسه‌ای می‌شوند. بگونه‌ای که رژیم شکست کیسه‌ای در جت دایروی در وبر هوای بیشتر از ۷، ولی در جت بیضوی با نسبت منظری ۳ زمانی‌که محور بزرگ آن موازی بر جهت جریان هوا قرار گرفته است در وبر هوای بیشتر از ۴/۷ پدیدار شد. نتایج حاکی از آن است که، جت‌های بیضوی بیشتر از جت دایروی به سمت جریان

- 453.
- [8] P.-K. Wu, K.A. Kirkendall, R.P. Fuller, A.S. Nejad, Breakup processes of liquid jets in subsonic cross-flows, *Journal of Propulsion and Power*, 13(1) (1997) 64-73.
- [9] C. Iyogun, M. Birouk, N. Popplewell, Trajectory of water jet exposed to low subsonic cross-flow, *Atomization and Sprays*, 16(8) (2006).
- [10] M. Birouk, T. Stähler, B. Azzopardi, An experimental study of liquid jets interacting with cross airflows, *Particle Systems Characterization*, 20(1) (2003) 39-46.
- [11] J.N. Stenzler, J.G. Lee, D.A. Santavicca, W. Lee, Penetration of liquid jets in a cross-flow, *Atomization and Sprays*, 16(8) (2006).
- [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] E. Farvardin, A. Dolatabadi, Breakup Simulation of Elliptical Liquid Jet in Gaseous Crossflow, in: 42nd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 2012, pp. 2817.
- [15] G. Amini, A. Dolatabadi, Axis-switching and breakup of low-speed elliptic liquid jets, *International Journal of Multiphase Flow*, 42 (2012) 96-103.
- [16] A. Jaber, M. Tadjfar, A. Sheidani, Experimental Comparison of Breakup and Flow Characteristics of Rectangular and Elliptical Water Jets, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 51(6) (2018) 31-40.
- [17] H.J. Yoon, J.G. Hong, C.-W. Lee, Correlations for penetration height of single and double liquid jets in cross flow under high-temperature conditions, *Atomization and Sprays*, 21(8) (2011).
- [18] Y. Zheng, Characterization of the initial spray from a jet in crossflow, 2009.
- [19] X.-h. Wang, Y. Huang, S.-l. Wang, Z.-l. Liu, Bag breakup of turbulent liquid jets in crossflows, *AIAA journal*, 50(6) (2012) 1360-1366.

شکست

عدد وبر

چگالی، kg/m^3

کشش سطحی N/m

لزجت N/m^2

جت مایع

هوا

شکست

بیشینه

BU

We

علائم یونانی

ρ

σ

μ

زیرنویس

j

a

b

max

منابع

- [1] N. Ashgriz, *Handbook of atomization and sprays: theory and applications*, Springer Science & Business Media, 2011.
- [2] M. Broumand, M. Birouk, Liquid jet in a subsonic gaseous crossflow: Recent progress and remaining challenges, *Progress in Energy and Combustion Science*, 57 (2016) 1-29.
- [3] J. Song, K. Ahn, M.-k. Kim, Y. Yoon, Effects of orifice internal flow on liquid jets in subsonic crossflows, *Journal of Propulsion and Power*, 27(3) (2011) 608-619.
- [4] Y. Song, D. Hwang, K. Ahn, Effect of orifice geometry on spray characteristics of liquid jet in cross flow, in: 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2017, pp. 1961.
- [5] S. Tambe, S.-M. Jeng, H. Mongia, G. Hsiao, Liquid jets in subsonic crossflow, in: 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2005, pp. 731.
- [6] J.A. Schetz, A. Padhye, Penetration and breakup of liquids in subsonic airstreams, *AIAA Journal*, 15(10) (1977) 1385-1390.
- [7] T. Chen, C. Smith, D. Schommer, A. Nejad, Multi-zone behavior of transverse liquid jet in high-speed flow, in: 31st Aerospace Sciences Meeting, 1993, pp.