

# Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(11) (2021) 753-756 DOI: 10.22060/mej.2019.15525.6149

# Study on the Base Flow of Two-Dimensional Liquid Jets Injected Into Quiescent Air

### A. Jaberi<sup>\*</sup>, M. Tadjfar

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

ABSTRACT: The flow dynamics of two-dimensional liquid jets issued into still air were experimentally studied. Three injectors with a thickness of 0.35 mm and aspect ratios of 30, 60 and 90 were used. The experiments were performed for volume flow rates ranging from 10 to 120 liter per hour. High speed photography was employed for capturing physics of the jet flows. The flow development of two-dimensional liquid jets was categorized into four groups including 1) dripping regime, 2) column regime, 3) triangular regime, and 4) perforation regime. Also, different parameters of liquid sheet such as convergence angle, convergence length, and retraction velocity were also measured. The obtained results showed that the convergence length of the jets increases with aspect ratio. Furthermore, it was revealed that the convergence angle and retraction velocity were independent of the aspect ratio. Based on the experimental data, several empirical relations were developed for description of different flow parameters.

### **Review History:**

Received: 2018/12/28 Revised: 2018/02/04 Accepted: 2019/05/05 Available Online: 2019/05/09

**Keywords:** Fuel spray Two-dimensional jets Liquid jet breakup Liquid injection

### **1-Introduction**

The experimental studies focusing on the fluid flow of a twodimensional liquid sheet discharged into quiescent air are rare. Indeed, the liquid sheets produced by two-dimensional injectors, have been mostly investigated in the presence of co-flow air to assist and accelerate the breakup process and achieve better mixing between liquid fuel and oxidant in the combustors.16 This method that has been the subject of many studies is well-known as airblast atomization. Rizk and Lefebvre [1], Stapper et al. [2], Mansour and Chigier [3], Carvalho et al. [4], Lozano et al. [5], and recently Oshima and Sou [6] are some known works that have studied the instability characteristics and breakup mechanisms of airblasted two-dimensional liquid sheets. However, the flow pattern of resulted two-dimensional liquid sheets in the absence of air co-flow was shortly mentioned in the works of Mansour and Chigier [3] and Carvalho et al. [4] According to their observations, the edge of the sheet recedes toward the axial axis due to the work of surface tension and thick blobs are formed at the edge. The length of the converging part of the sheet was obtained and reported in both studies, though a significant difference existed between the two sets of results as was shown by Carvalho et al. [4]. As far as the authors are aware, no more quantitative or qualitative results about the flow physics of liquid sheets issuing from twodimensional orifices have been reported. In this study, the

flow characteristics of liquid sheets injected from thin slits with high aspect ratios were experimentally investigated. The flow features were captured from both front and side views and corresponding quantitative results were reported and discussed. To the authors' knowledge, the instabilities studied in this work had never been previously derived from experimental measurements.

#### 2- Experimental Setup

The experimental setup used in this study is the same one previously employed and well described by Jaberi and Tadjfar [7]. Two-dimensional liquid jets were produced through slits of very high aspect ratios. Three injectors with an equivalent thickness of 0.35 mm and aspect ratios of 30, 60 and 90 were manufactured from stainless steel. These injectors are respectively indexed as TD1, TD2, and TD3. The injectors were accommodated into a settling chamber with diameter of 45 mm and length of 800 mm. The schematic of the injector and settling chamber assembly is provided in Fig. 1. In order to visualize the details of the jet flow structure, diffused backlight shadowgraphy was implemented. Moreover, a high speed camera was implemented to capture the instantaneous features of the flow at high frame rates and low exposure time. The photos were taken by a Nikon 1 J4 camera, equipped with a Macro-NIKOOR AF-S 60 mm lens. All the photos of this study were taken with 1200 fps and exposure time of 62.5

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



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article  $(\mathbf{i})$ is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://mej.aut.ac.ir/article\_3404.html.

µs. An in-house code was developed to process the photos taken from two-dimensional liquid jets injected into still air.



Fig. 1. Schematic of the injector assembly.

### **3- Results and Discussion**

Different regimes associated with the development of a twodimensional liquid jet that is emanated into stagnant air is represented in Fig. 2. We have proposed four regimes which are: 1) Dripping regime, 2) Column regime, 3) Triangular regime, and 4) Perforation regime. Dripping regime happens at low jet velocities where jet inertia is very small and surface tension is completely prominent. With increase of jet velocity, liquid jet leaves the injector as a column that breaks at a distance downstream.



The triangular regime is shown in Fig. 2 for the velocity of 2.42 m/s, wherein the liquid inertia was increased gradually so that the liquid leaves the injector as a sheet. Due to the work of surface tension, the edges of the liquid jet retreat towards its central axis and establishes thick borders. This retraction of jet borders and its convergence towards the central axis forms a triangular shape. By more increase of jet velocity, instabilities are emerged and grown within the liquid jet. These instabilities are well seen immediately downstream of the jet exit in Fig. 2 for the photo representing perforation regime. Due to the growth of these instabilities, some local ruptures occur across the thin liquid sheet. These perforations become larger in time and finally reach the thick borders of the liquid jet and then disintegrates. In Fig. 3, the variation of jet convergence angle with jet exit velocity is plotted. As seen, convergence angle exhibits an asymptotic behavior so that by increase of jet velocity,  $\beta_{o}$  approaches to 90°. For jet velocities smaller than 2 m/s, the variation of convergence angle is very extreme but for higher velocities, it increases at a slower pace.





Fig. 4. Variations of convergence length.

According to Fig. 4, for all jets, the convergence length increases linearly with velocity. The increase of jet velocity leads to the strengthening of jet inertia which competes with surface tension that attempts to retract the jet boundaries. Resultantly, the process of jet convergence happens slower that makes the convergence length longer. On the other hand, this increase of convergence length is completely depending on aspect ratio, so as for the TD1 jet the rate of L<sub>c</sub> increase is slower than others and for TD3 jet, L increases with a steeper slope. For low jet velocities where surface tension is dominant, the retraction velocity is high, but with increase of jet velocity and jet inertia, retraction velocity decreases as well. The variations of retraction velocity,  $V_{_{\rm R}}$ , with jet velocity are given in Fig. 5 for TD1, TD2, and TD3 jets. As seen, at low velocities where surface tension forces are dominant, retraction velocity is high, but with jet velocity increase, it decreases gradually until reaching a constant value.



Fig. 5. Retraction velocity of liquid jets.

### **4-** Conclusions

The main flow characteristics of two-dimensional liquid jets issued into still air were experimentally investigated. The flow of the two-dimensional liquid jets was categorized into four different regimes including the dripping regime, column regime, triangular regime, and perforation regime. The main features of the two-dimensional liquid jets in triangular regime were measured.

### **5- References**

- N. Rizk, A. Lefebvre, The influence of liquid film thickness on airblast atomization, Journal of Engineering for Power, 102(3) (1980) 706-710.
- [2] B. Stapper, W. Sowa, G. Samuelsen, An experimental study of the effects of liquid properties on the breakup of a twodimensional liquid sheet, in: ASME 1990 International Gas

Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, ASME, 1990, pp. V003T006A032.

- [3] A. Mansour, N. Chigier, Dynamic behavior of liquid sheets, Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, 3(12) (1991) 2971-2980.
- [4] I. Carvalho, M. Heitor, D. Santos, Liquid film disintegration regimes and proposed correlations, International journal of multiphase flow, 28(5) (2002) 773-789.
- [5] A. Lozano, F. Barreras, C. Siegler, D. Löw, The effects of sheet thickness on the oscillation of an air-blasted liquid sheet, Experiments in fluids, 39(1) (2005) 127-139.
- [6] I. Oshima, A. Sou, Longitudinal oscillation of a liquid sheet by parallel air flows, 110 (2019) 179-188.
- [7] A. Jaberi, M. Tadjfar, Flow Characteristics of Water Jets Discharging from Rectangular and Elliptical Injectors, in: ASME 2018 5th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting, ASME, 2018, pp. V003T018A001.

This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۱۱، سال ۱۳۹۹، صفحات ۳۰۴۵ تا ۳۰۵۶ DOI: 10.22060/mej.2019.15525.6149

# بررسی فیزیک پایه جتهای مایع دو بعدی تزریق شده به درون جریان هوای ساکن

امین جابری\*، مهران تاجفر

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری: دریافت: ۰۷–۱۰–۱۳۹۷ بازنگری: ۱۵–۱۱–۱۳۹۷ پذیرش: ۱۵–۰۲–۱۳۹۸ ارائه آنلاین: ۱۹–۲۰–۱۳۹۸

> کلمات کلیدی: پاشش سوخت جت دو بعدی شکست جت مایع تزریق مایع

خلاصه: فیزیک جریان جتهای مایع دو بعدی تزریق شده به درون جریان هوای ساکن به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. از سه انژکتور با ضخامت ۰۳۵ میلیمتر و با ضرایب منظری ۳۰ ۲۰ و ۹۰ برای ایجاد جریان مایع دو بعدی بهره گرفته شده است. آزمایشها در بازه گستردهای از دبی حجمی، بین ۱۰ تا ۱۲۰ لیتر بر ثانیه انجام شده و تصویربرداری سرعت بالا برای آشکارسازی و ثبت ساختار لحظهای جریان مایع دو بعدی استفاده شده است. به کمک تصاویر آشکارسازی، رفتار جریان جت دو بعدی در رژیمهای مختلف شناسایی و برای اولین بار در چهار گروه دستهبندی شده است. این چهار گروه شامل رژیم قطره چکان، رژیم ستونی، رژیم مثلثی و رژیم حفرهای میشود. همچنین پارامترهای مختلف صفحه جت مایع دو بعدی همچون زاویه همگرایی جت، طول همگرایی جت، سرعت عقبنشینی صفحه مایع و طول شکست جت اندازه گیری شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که طول همگرایی جت با افزایش ضریب منظری جت افزایش پیدا می کند. همچنین دیده شد که زاویه همگرایی و سرعت عقبنشینی جت با افزایش ضریب منظری جت افزایش پیدا می کند. همچنین دیده شد که زاویه همگرایی و سرعت عقبنشینی جت با افزایش ضریب منظری جت افزایش پیدا می کند. همچنین دیده شد که زاویه همگرایی و سرعت عقبنشینی جت با افزای ضریب منظری

### ۱–مقدمه

تزریق مایع به صورت یک صفحه دارای کاربردهای گوناگونی در صنایع مختلف میباشد. کاربردهای جتهای مایع صفحهای شامل مبدلهای حرارتی [۱]، ریخته گری فیلم فلزات [۲]، انجماد سریع فلزات [۳] و از همه مهمتر پوشش دهی مواد میباشد که در آن یک لایه از مایع به صورت صفحهای یکنواخت بر روی سطح مورد نظر قرار داده میشود [۴]. برای تولید جریان صفحه مایع روشهای متنوعی وجود دارد [۵]، اما در این پژوهش به صورت خاص به جریان صفحه مایع ایجاد شده توسط انژکتورهای دو بعدی، پرداخته میشود. این نوع جریان مایع که به صورت گسترده در انژکتورهای هوا-انفجاری استفاده میشوند را میتوان با عبور مایع از یک شیار با ضخامت کم و طول بلند به وجود دارد.

عمده تحقیقات انجام شده بر روی ناپایداری جتهای مایع دو بعدی به صورت تئوری بوده است. اسکوایر [۶] ناپایداری یک صفحه مایع غیرلزج با ضخامت یکنواخت را با در نظر گرفتن دو مود از

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

لزجت مایع و تغییر ضخامت صفحه، این پژوهش، بعدها توسط دومبروسکی و جانز [۷] تکمیل شد. تیلور، در ضمیمهای به مقاله براون [۸]، یک معادله دیفرانسیلی غیرخطی برای توصیف سرعت طولی صفحه مایع به دست آورد. در این تئوری، تیلور از اثرات کشش سطحی مایع صرفنظر کرد و همچنین تغییرات سرعت و فشار در عرض صفحه را ثابت در نظر گرفت. در ادامه، کلارک [۹] یک جت مایع دو بعدی لزج و پایا را که تحت تأثیر نیروی جاذبه جریان پیدا میکند را به صورت تحلیلی بررسی کرد و دو معادله برای حل جریان در نواحی بالادست (نزدیک به صفحه خروجی انژکتور) و در پایین نصت آن به دست آورد. آداچی [۱۰] نیز معادلهای برای تخمین ضخامت یک صفحه مایع آرام که به درون هوای ساکن تزریق میشود، ارائه داد. با اعمال معادلات ناویر استوکس به یک صفحه مایع لزج دو بعدی که در بین دو سیم راهنما قرار گرفته، آیدون [۱۱] رابطهای برای تغییرات سرعت طولی جت عرضه کرد که در آن اثرات کشش

موجهای نوسانی متقارن و نامتقارن تحلیل کرد. با در نظر گرفتن

Creative Commons License) حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

از روش های مجانبی، معادلهای ناپایا برای توصیف دینامیک جریان صفحه مایع لزج در اعداد رینولدز پایین ارائه داد [۱۲]. اثرات کشش سطحی بر روی فیزیک جریان یک صفحه مایع غیرلزج توسط کوپولا [۱۳] مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش، مدلی برای محاسبه تغییرات سرعت طولی و ضخامت جت ارائه شد. تمامی مطالعاتی که تا اینجا به آنها اشاره شد به صورت تحلیلی، ناپایداری جتهای مایع دو بعدی را بررسی کردهاند و هیچ یک از آنها به ساختار فیزیکی مرزهای جت نپرداختهاند. همچنین، عقبنشینی مرزهای کناری جتهای دو بعدی بر اثر نیروی کشش سطحی و ایجاد کنارههای ضخیم در اطراف جت، به صورت تحلیلی توسط سانگ و تریگواسون [۱۴] و ساندرهاف و همکاران [۱۵] بررسی شده است.

برخلاف مطالعات تئوری، پژوهشهای تجربی بر روی جتهای مایع دو بعدی تزریق شده به درون هوای ساکن بسیار اندک هستند. در حقیقت، عمده مطالعات تجربی انجام شده بر روی جتهای مایع دو بعدی، در حضور جریان هوای موازی در ساختار انژکتورهای هوا-انفجاری بوده است. با توجه به اینکه این انژکتورها عمل شکست سوخت مايع را تسريع مي بخشند و موجب بهبود اختلاط بين هوا و سوخت مايع مي شوند، مطالعات بر روى آنها گسترده بوده است [18]. در میان عمده پژوهشهای انجام شده میتوان به کارهای استاپر و همکاران [۳]، منصور و چیگیر [۱۷]، کاروالهو و همکاران [۱۸]، لوزانو و همکاران [۱۹] و اخیراً نیز اوشیما و سوو [۲۰] اشاره کرد. در هر حال، با وجود اینکه این مطالعات به بررسی جت مایع دو بعدی در حضور جریان هوای موازی پرداختهاند، اما منصور و چیگیر [۱۷] و کاروالهو و همکاران [۱۸] به صورت مختصر فیزیک جت مایع دو بعدی، بدون حضور جریان هوای موازی را نیز بررسی کردهاند. مطابق مشاهدات صورت گرفته، مرزهای جت مایع دو بعدی، به خاطر نیروی کشش سطحی، به سمت محور طولی جت عقبنشینی می کند و لبه های ضخیمی در اطراف آن شکل می گیرد. به خاطر این عقبنشینی یک ناحیه همگراشونده ایجاد می شود. طول همگرایی در هر دو پژوهش منصور و چیگیر [۱۷] و کاروالهو و همکاران [۱۸] محاسبه شده است، اگر چه اختلاف زیادی بین نتایج دو این دو مطالعه وجود دارد [۱۸].

بنابر مطالعه پیشینهای که توسط نویسندگان این مقاله انجام شده است، هیچ پژوهش دیگری که به بررسی فیزیک جریان مایع دو



شکل ۱: طرحواره سیستم تجربی به کار گرفته شده در این پژوهش Fig. 1. Schematic of the experimental setup used in the study

بعدی پرداخته و پارامترهای مختلف آن را به صورت کمّی گزارش کرده باشد، وجود ندارد. در واقع رفتار پایه یک جت مایع دو بعدی که به درون جریان هوای ساکن تزریق میشود، به صورت جامع بررسی نشده و مشخصههای مختلف فیزیک آن طبقهبندی نشده است. همچنین، تزریق جت مایع دو بعدی، بدون حضور جریان هوای موازی، دارای کاربردهای گسترده دیگری است که نیاز به انجام یک پژوهش جامع را ضروری میسازد. در این پژوهش، ویژگیهای جریان مایع دو بعدی ایجاد شده توسط سه انژکتور شیاری، با ضخامتهای یکسان و ضرایب منظری مختلف بررسی شده است. فیزیک جریان جت شناسایی و طبقهبندی شده و پارامترهای مرتبط به آن به صورت

## ۲-تجهیزات تجربی و روش انجام پژوهش

در این بخش سیستمها و تجهیزات تجربی به کار رفته، نحوه آشکارسازی جریان و پردازش تصویر، و همچنین شرایط انجام آزمایشها در سه بخش ارائه شده است.

# ۲-۱- انژکتورها و سیستم تزریق مایع

طرحواره کلی سیستم تجربی استفاده شده در این مطالعه در شکل ۱ آمده است. مطابق شکل، از گاز نیتروژن فشرده شده برای اعمال فشار به آب نگهداری شده در یک مخزن ۷۰ لیتری استفاده شده است. این حجم از مخزن مایع اجازه میدهد که انجام آزمایشها



شکل ۲: هندسه کامل محفظه آرامش و انژکتور. الف) ابعاد سرهمبندی شده، ب) نمای ایزومتریک. Fig. 2. Detailed geometry of the settling chamber and injector. a) Assembled, b) Isometric view

است. دوربین مورد استفاده در این تحقیق دوربین دیجیتالی نیکون ۱ جی ۴ میباشد که زمان نورگیری آن تا ۶۲/۵ میکرو ثانیه کاهش مییابد. این مدت زمان برای ثبت جزئیات سریع جریان مایع کافی میباشد. رزولوشن بیشینه این دوربین ۵۲۳۲ در ۳۴۸۸ میباشد که امکان سنجش دقیق پارامترهای طولی با خطای بسیار کم را مهیا ساخته است.

پس از عکسبرداری، تصاویر ثبت شده توسط یک کد پردازش تصاویر که با برنامه متلب توسعه داده شده است، مورد تحلیل قرار گرفتهاند. این کد بر اساس اختلاف موجود بین شدت پیکسلهای مرزهای جت و پسزمینه کار میکند و میتواند پروفیل جت را به صورت یک شکل یکدست تولید کند. در یک تصویر سیاه و سفید، پیکسلهای سفید دارای شدت نزدیک به ۱ و پیکسلهای سیاه دارای

جدول ۱: مشخصات هندسی انژکتورها	
Table 1. Geometrical details of the injectors	

ضريب منظرى	عرض (mm)	صخامت (mm)	انژکتور
30	10/5	0/35	TD1
60	21	0/35	TD2
90	31/5	0/35	TD3

در یک بازه زمانی نسبتاً طولانی قابل انجام باشد. فشار گاز نیتروژن بر روی مخزن به وسیله یک رگلاتور فشار کنترل شده و در طول تمامی آزمایشها فشار ۴/۵ بار بر روی مخزن اعمال شده است. به منظور کمینه کردن تداخلات بین گاز پرفشار و مایع درون مخزن، از یک صفحه حائل استفاده شده که از برخورد مستقیم گاز به مایع جلوگیری میکند. همچنین، آهنگ جریان حجمی مایع توسط شیرهای سوزنی کنترل و به کمک دو روتامتر اندازه گیری میشود. براساس کالیبراسیون انجام شده، خطای اندازه گیری روتامترها کمتر از ۰/۱۵ لیتر بر ساعت بوده است.

جتهای مایع دو بعدی با ایجاد شیارهایی با ضخامت خیلی کم و طول زیاد تولید میشوند. بدین منظور، سه انژکتور با ضخامتهای ۸۳/۰ میلیمتر و با طولهای ۱۰/۵ ۲۱ و ۲۱/۵ میلیمتر ساخته شده است. ضریب منظری این جتها به ترتیب ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میباشد. خلاصه اطلاعات هندسی انژکتورها در جدول ۱ گزارش شده است. به منظور جلوگیری از زنگزدگی، انژکتورها از جنس استیل ضد زنگ بوده و شیارهای آنها با روش ماشین کاری برش سیم ایجاد شده است که دارای دقت بسیار بالایی در برشکاری میباشند. جریان مایع قبل از ورود به انژکتور، وارد یک محفظه آرامش به طول ۸۰ میلیمتر و قطر ۴۵ میلیمتر میشود تا ناپایداریهای درون جریان مایع کمینه میشود. ساختار کلی محفظه آرامش و انژکتور در شکل مایع کمینه میشود. ساختار کلی محفظه آرامش و انژکتور در شکل

# ۲-۲- آشکارسازی جریان جت مایع

برای ثبت فیزیک جریان جتهای مایع دو بعدی، از روش سایهنگاری استفاده شده است. در این روش از دو چشمه نور ال ای دی، به منظور روشن کردن پسزمینه جت بهره گرفته شده که به صورت ثابت عمل میکنند. برای ثبت تصاویر جت، از یک دوربین سرعت بالا با قابلیت تصویربرداری ۱۲۰۰ فریم بر ثانیه استفاده شده



Fig. 5. Variations of Reynolds number with liquid jet velocity

۲-۳- شرایط انجام آزمایشها

در تمامی آزمایش ها از آب به عنوان مایع کاری استفاده شده  $ho = 990 \text{kg} / \text{m}^{\text{r}}$  است. بر این اساس، خواص آب به صورت چگالی  $ho = 990 \text{kg} / \text{m}^{\text{r}}$  و تنش سطحی ، لزجت  $ho = 10^{-7} \text{kg} / \text{ms}$  و تنش سطحی  $ho = 10^{-7} \text{kg} / \text{ms}$  و تنش سطحی دبی حجمی مورد آزمایش قرار گرفته شده است. کمینه و بیشینه ماعت بوده است. عدد وبر و عدد رینولدز جت طبق معادله های (۱) و (۲) تعریف می شوند که در این روابط t ضخامت انژکتور و V سرعت خروجی جت مایع می باشد.

- $We = \frac{\rho V^2 t}{\sigma} \tag{1}$
- $\operatorname{Re} = \frac{\rho V t}{\mu} \tag{(7)}$



شکل ۳: روش پردازش تصویر و جداسازی پروفیل جت مایع Fig. 3. Image processing method and dissociation of the liquid jet profile

شدت تصویر نزدیک به صفر هستند. بنابراین، میتوان با اعمال یک فیلتر مناسب بر روی تصویر خام اولیه، مرزهای جت مایع را که دارای شدت پیکسل کمتری هستند از تصویر پس زمینه که دارای شدت پیکسل بزرگتری هستند جدا کرد. این فرآیند در شکل ۳ نشان داده شده است. چنان که در شکل دیده میشود، نقاط بین مرزهای جت نیز توسط کد سیاه شده است تا پروفیل کامل جت به صورت یکدست به دست آید. از این تصویر دودویی برای محاسبه پارامترهای مورد نظر استفاده میشود. همچنین باید اشاره شود که برای پیدا پیکسل های آن به صورت خودکار توسط کد شناخته شده و با توجه اندازه گیری دقیق قطر آن، میتوان ابعاد هر پیکسل را به دست آورد. از قابلیتهای مطلوب کد این است که توانایی پردازش هزاران تصویر را در مدت زمان نسبتاً کوتاهی را دارا میباشد که این ویژگی موجب شد در هر شرایط تعداد بالایی از تصاویر ثبت شود و نتایج گزارش شده نهایی دقیق تر باشد.

تغییرات عدد وبر و عدد رینولدز به ترتیب در شکلهای ۴ و ۵ نشان داده شده است. چنان که دیده می شود به دلیل مساحت خروجی کمتر انژکتور ۱TD، سرعت خروجی آن بیشتر از دیگر جتها بوده و بنابراین به اعداد وبر و رینولدز بالاتری نسبت به انژکتورهای دیگر دست پیدا کرده است. نسبت نیروی اینرسی جت به نیروی گرانشی توسط عدد فرود بیان می شود که رابطه آن در معادله (۳) آمده است.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gt}} \tag{(7)}$$

مطابق این رابطه، در اغلب آزمایشهای انجام شده، سرعت جت به اندازه کافی بزرگ بوده است که بتوان از اثرات گرانش صرفنظر نمود. همچنین باید اشاره شود که در هر شرایط جریان، آزمایشها پنج بار تکرار شده که در هر بار آزمایش، نزدیک به ۲۵۰ عکس از جت گرفته شده است. به این ترتیب مقادیر گزارش شده در این مقاله، از میانگین بیش از ۱۲۰۰ عکس به دست آمده است. برای تحلیل خطای پارامترهای اندازه گیری شده از روشهای آماری مرسوم استفاده شده که شرح آن در مرجع [۲۱] آمده است.

### ۳-نتايج و بحث

با استفاده از تصاویر آشکارسازی فیزیک جریان مایع دو بعدی به خوبی شناسایی و معرفی شده است. به کمک آشکارسازیهای انجام شده، ساختار جریان جت مایع دو بعدی و تغییرات آن با سرعت جریان به خوبی توصیف و طبقهبندی شده است. همچنین، پارامترهای اصلی جریان نیز به صورت عددی و به کمک کدهای پردازش تصویر محاسبه و ارائه شده است. در بخش اول، ابتدا رفتار کلی جریان و رژیمهای مختلف جریان مایع دو بعدی توصیف شده و سپس در بخش بعدی، ساختار جریان مایع به صورت کمّی گزارش شده است.

### ۲-۱- رفتار کلی جریان جت دو بعدی

مهمترین نیروهایی که به یک جت مایع دو بعدی وارد میشوند نیروهای کشش سطحی و اینرسی هستند. غالب بودن هر یک از این دو نیرو تعیین میکند که رفتار جت مایع دو بعدی چگونه است. به کمک تصاویر آشکارسازی، رژیمهای مختلف این جریان، که به واسطه





تغییر اندازه این نیروها تعیین می شود، شناسایی و طبقه بندی شده است. در شکل ۶، رژیمهای مختلف توسعه جریان مایع دو بعدی ارائه شده است. تصاویر ارائه شده در این شکل مربوط به جت TD ۲ میباشد. چنانکه دیده میشود چهار رژیم برای این جریان پیشنهاد شده است که شامل ۱) رژیم قطره چکان، ۲) رژیم ستونی، ۳) رژیم مثلثی و ۴) رژیم حفرهای میباشد. رژیم قطره چکان در سرعت و اعداد وبر بسیار پایین رخ میدهد که در آن اینرسی جت بسیار پایین بوده و کشش سطحی نیروی کامل غالب است. در این رژیم که در جتهای دیگر (همچون دایروی، بیضوی یا مستطیلی) نیز مشاهده می شود، مایع خروجی از انژکتور بلافاصله به صورت قطره چکیده می شود. در سرعت های بالاتر که اینرسی جت مایع افزایش می یابد اما هنوز نیروی کشش سطحی غالب است، جت مایع به صورت یک ستون خارج می شود و پس از طی مسافتی شکسته می شود. این مرحله که رژیم ستونی نام گرفته است، رفتاری مشابه با رفتار یک جت مایع دایروی مشاهده می شود [۲۲]. در حقیقت، در این رژیم نیروی کشش سطحی به قدری غالب است که تمامی مایع موجود در صفحه خروجی انژکتور را جمع کرده و در نقطه میانی به صورت یک ستون تزريق مىشود.

رژیم مثلثی مهمترین رژیمی است که جریان جت مایع دو بعدی تجربه میکند. در این رژیم که در شکل ۶ با سرعت ۲/۴۲



TD ۲ شکل ۸: ساختار جریان صفحه مایع برای جت Fig. 8. Flow structure of liquid sheet for TD2 jet

جت به صورت نسبتاً خطی با افزایش سرعت جت و افزایش اینرسی جریان، افزایش یافته است. البته باید توجه داشت که برای جت ۱ یک کمینه محلی وجود دارد که در آن طول شکست جت یک کاهش نسبی داشته و سپس دوباره روند افزایش خود را از سر میگیرد. با توجه به نتایج به دست آمده دیده میشود که در سرعتها پایین، طول شسکت جت تقریباً مستقل از انژکتور بوده و برای هر سه هندسه تقریباً رفتار یکسانی دیده میشود، اما با افزایش سرعت جت، اختلاف بین جتها افزایش پیدا میکند. همچنین مشاهده میشود که جتهای ۲ TD و ۳ TD اختلاف اندکی با همدیگر دارند که میتواند حاکی از این نکته باشد که با افزایش ضریب منظری، طول شکست

### ۳-۲- مشخصههای صفحه مایع جت دو بعدی

در این بخش فیزیک جریان جتهای مایع دو بعدی به طور کامل و به صورت کیفی و کمّی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۸ تغییرات ساختار جریان جت دو بعدی از نمای روبرو با افزایش سرعت خروجی از ۰/۶۱ متر بر ثانیه تا ۴/۵۴ متر بر ثانیه، نشان داده شده است. تمام تصاویر ارائه شده مربوط به رژیمهای مثلثی است، مگر تصویر آخر که مربوط به رژیم حفرهای است. در سرعتهای پایین همچون ۰/۶۱ و ۰/۹۱ متر بر ثانیه، نیروی اینرسی جریان کوچک



شکل ۷: تغییرات طول شکست جت مایع دو بعدی با سرعت جریان Fig. 7. Variations of two-dimensional liquid jet breakup length with jet velocity

متر بر ثانیه مشخص شده است، اینرسی جت به قدری افزایش یافته است که جریان مایع به صورت یک صفحه تزریق می شود. به دلیل وجود نیروی کشش سطحی، مرزهای کناری جت مایع به سمت محور مرکزی آن عقبنشینی میکنند و تشکیل لبههای ضخیمی را مىدهند. عقبنشيني اين لبهها باعث همگرايي صفحه جت و ايجاد شکلی مثلثی می شود. تغییرات طول بخش مثلثی که به عنوان طول همگرایی شناخته میشود و همچنین زاویه همگرایی آن به صورت کامل در بخش بعدی بررسی می شود. با افزایش بیشتر سرعت جت و رشد آشفتگیها بر روی جت، صفحه نازک مایع دچار پارگی موضعی می شود و جت مایع دو بعدی وارد رژیم حفرهای می شود. این پارگی اولیه تحت تأثیر نیروی کشش سطحی رشد پیدا کرده و باعث ایجاد حفرهای درون بخش مثلثی جت می شود. این حفره با گذر زمان رشد پیدا کرده تا اینکه نهایتا به لبههای کناری جت رسیده و موجب شکست زود هنگام مایع می شود. با افزایش بیشتر سرعت جت، تعداد دفعات وقوع این حفرهها نیز بیشتر می شود و به همین دلیل سطح جت دچار شکستگیهای مداوم میشود.

تغییرات طول شکست جت دو بعدی مطابق تعریف ارائه شده در شکل ۳ اندازه گیری شده و نتایج به دست آمده برای همه انژ کتورها در شکل ۷ آورده شده است. این نمودار شامل تغییرات طول شکست جت دو بعدی در رژیمهای ستونی و مثلثی میباشد که طول پیوسته و مشخصی از جریان جت تشکیل میشود. چنان که دیده میشود برای هر سه جت رفتاری افزایشی دیده میشود که طول شکست



شکل ۱۰: مشخصههای اصلی صفحه مایع Fig. 10. Main characteristics of the liquid sheet

سرایت می کند به گونهای که سطح این لبهها دیگر یکدست و صاف نیست و موجهایی با دامنههای کوچک بر روی آنها ظاهر شده است. همچنین ساختار منظمی که در موجهای ضربدری در سرعتهای يايين وجود داشت، به دليل حضور اين آشفتگىها مخدوش شده است. با افزایش بیشتر سرعت جت و تقویت اغتشاشهای درونی جریان آشفته، رژیم حفرهای آغاز شده و سوراخهای کوچکی بر روی سطح نازک جت مایع تشکیل می شود. وجود حفره در تصویر مربوط به سرعت ۴/۵۴ متر بر ثانیه به خوبی دیده می شود. نحوه شکل گیری و توسعه یافتگی حفره بر روی صفحه جت و شکست آن به طور کامل در شکل ۹ نمایش داده شده است. در این شکل که شامل تصاویر متوالی در یک بازه زمانی ۱۸ میلی ثانیهای میباشد، سیر زمانی ساختار حفره در ۸ تصویر، آمده است. در لحظه شروع، یک ناپایداری بر روی صفحه نازک جت موجب شکستگی اولیه صفحه جت می شود. با ایجاد این شکستگی، نیروی کشش سطحی باعث عقبنشینی صفحه جت در اطراف حفره می شود و به این ترتیب ابعاد حفره رشد پیدا می کند. چنان که مشاهده می شود مایع جت به صورت لبه هایی در اطراف حفره تجميع مىشود كه ضخامت آن با گذر زمان بيشتر مىشود. افزایش ابعاد حفره تا زمانی ادامه پیدا می کند که حفره کاملاً به لبههای کناری جت میرسد و تشکیل یک حفره بزرگ را میدهد. به دلیل اینرسی عرضیای که درون لبههای حفره وجود دارد، رشد حفره ادامه پیدا می کند تا اینکه سرانجام در قسمتهای ناز کتر لبه حفره، کشش سطحی موجب شکست حفره و جت می شود. این شکستگی



TD ۲ شکل ۹: تغییرات زمانی حفره ایجاد شده بر روی صفحه مایع جت در سرعت ۴/۵۴ متر بر ثانیه

Fig. 9. Time evolution of the perforation formed over the sheet of TD2 jet at the velocity of 4.54 m/s

است و نیروی کشش سطحی غالب است. در این سرعتها، نیروی کشش سطحی موجب همگرایی سریع صفحه جت می شود و به همین دلیل لبههای ضخیمی در کنارههای جت تشکیل می شود. با افزایش سرعت جت (۱/۵۱ و ۱/۲۱ متر بر ثانیه) و با تقویت شدن نیروی اینرسی، ناحیه همگرایی صفحه جت کشیدهتر می شود و ضخامت لبههای تشکیل شده نازکتر می شود. همچنین در این سرعت، تشکیل موجهای ضربدری در ناحیه میانی صفحه جت کاملاً مشهود است. این موجهای ضربدری که از لبههای صفحه جت تشکیل می شوند. به دلیل افزایش ضخامت لبههای صفحه جت تشکیل می شوند.

در سرعتهای بالاتر صفحه جت، به تدریج جریان آشفته شده و ناآرامیهای ریزی بر روی صفحه میانی جت (ناحیه بین لبههای جت) ظاهر میشوند. نحوه افزایش تشکیل این ناآرامیهای در تصاویر بین سرعتهای ۲/۱۲ متر بر ثانیه تا ۳/۹۳ متر بر ثانیه به خوبی مشهود است. همچنین میتوان گفت که این ناآرامیهای به لبههای جت نیز



شکل ۱۲: تغییرات طول همگرایی جتهای مایع دو بعدی با سرعت جت خروجی



که مؤید این نکته است که زاویه همگرایی جت تنها به ضخامت آن بستگی دارد و مستقل از طول آن است. در حقیقت، با توجه به اینکه نیروی کشش سطحی، که عامل ایجاد این همگرایی است، تنها به ابتدا و انتهای جت وارد میشود و با توجه به یکسان بودن انحنای جت در آن نواحی، صفحه مایع در هر سه انژکتور با زاویه یکسانی جمع میشود و با افزایش طول جت تغییر نمی کند. با برازش نتایج به دست آمده از هر سه منحنی در فرم یک تابع نمایی، میتوان به یک رابطه تجربی برای تغییرات زاویه همگرایی بر حسب سرعت جت خروجی رسید. معادله به دست آمده در رابطه (۴) آورده شده است.

$$\beta_c = 93.52 Exp\left(-\frac{0.487}{V_j}\right) \tag{(f)}$$

که در این رابطه سرعت جت خروجی،  $V_j$  برحسب متر بر ثانیه و زاویه همگرایی  $\beta_c$ ، درجه میباشد. خطای استاندارد و ضریب تشخیص این رابطه به ترتیب برابر است با ۱۸۶۶ و ۱۸۹۶۰ طول همگرایی جت مایع دو بعدی از آن جهت دارای اهمیت است که میزان نفوذ صفحه مایع را در محیط مشخص میسازد. مطابق شکل میزان نفوذ صفحه مایع را در محیط مشخص می میازد. مطابق شکل جت به هم می رسند به عنوان طول همگرایی جت در نظر گرفته شده است. تغییرات طول مایع با سرعت جت خروجی برای هر سه در شکل است. تغییرات طول می با می در این میکرایی است. تغییرات مول همگرایی جت در نظر گرفته شده است. تغییرات طول همگرایی جت در نظر گرفته شده است. تغییرات مول همگرایی جت در نظر گرفته شده است. تغییرات مول همگرایی جت در این شکل دیده می شود، طول همگرایی



شکل ۱۱: تغییرات زاویه همگرایی جتهای مایع دو بعدی با سرعت جت خروجی

Fig. 11. Variations of convergence angle of two-dimensional liquid jets with exit velocity

معمولاً روی یکی از شاخههای حفره اتفاق می افتاد. مطابق شکل ۱۰، سه پارامتر اصلی وجود دارد که به کمک آنها می توان رفتار جت مایع را توصیف کرد. این سه پارامتر شامل زاویه همگرایی، طول همگرایی و سرعت عقبنشینی جت مایع می باشند. زاویه همگرایی جت مایع،  $\beta^c$ ، زاویه بین خط افق صفحه خروجی انژکتور و مرزهای جت مایع، ت<sup>eta</sup>، زاویه بین خط افق صفحه خروجی کشش سطحی ایجاد می شود. طول همگرایی، <sup> $L_c$ </sup>، طولی است که از صفحه خروجی جت تا نقطه برخورد مرزهای جت از طرفین تعریف می شود و سرعت عقبنشینی جت، <sup> $N_a$ </sup>، سرعت همگرا شدن جت از طرفین می باشد. در ادامه نتایج به دست آمده برای تغییرات هر یک از این سه پارامتر با سرعت تزریق جت مایع برای همه انژکتورهای مورد بررسی آمده و با هم مقایسه شده است.

در شکل ۱۱، تغییرات زاویه همگرایی جتهای مایع دو بعدی برای هر سه انژکتور داده شده است. چنان که مشاهده میشود، زاویه همگرایی دارای رفتاری نمایی است به گونهای که با افزایش سرعت خروجی جت، زاویه همگرایی به ۹۰ درجه میل میکند. در واقع، برای سرعتهای کمتر از ۲ متر بر ثانیه، تغییرات زاویه همگرایی بسیار شدید بوده اما برای سرعتهای بالاتر، زاویه همگرایی جت با آهنگ آرامتری تغییر میکند تا نهایتاً به سمت ۹۰ درجه میل میکند. نکته قابل توجه یکسان بودن رفتار جتها با ضرایب منظری مختلف است. چنان که دیده میشود، هر سه جت رفتار کاملاً یکسانی بروز دادهاند جت نسبت به عرض جت، W، میتوان به یک رفتار کلی رسید. در شکل ۱۳ تغییرات طول همگرایی بدون بعد با سرعت جت برای هر سه انژکتور آورده شده است. چنان که پیداست، نتایج به دست آمده از هر سه انژکتور کاملاً بر هم منطبق بوده و یک رفتار یکسان را بروز میدهند. از برازش نتایج ارائه شده در شکل ۱۳ میتوان به رابطهای تجربی رسید که به خوبی رفتار طول همگرایی بدون بعد صفحه جت را توصیف میکند. این رابطه که در معادله (۵) داده شده است در شکل ۱۳ به صورت خط توپر رسم شده است. در این رابطه سرعت جت خروجی بر حسب متر بر ثانیه وارد میشود. خطای استاندارد و همچنین ضریب تشخیص این رابطه به ترتیب با ۲۰۹۵ و ۱۹۹۷ برابر است.

$$\frac{L_c}{W} = 0.924V_j - 0.1$$
 ( $\Delta$ )

سرعت عقبنشینی یا سرعت همگرایی صفحه جت در واقع پارامتری است که بیانگر تقابل نیروی کشش سطحی و اینرسی طول جت میباشد. نحوه محاسبه سرعت عقبنشینی جت در شکل ۱۴ توضیح داده شده است. مطابق شکل، برای هر تصویر دو ایستگاه عمودی که با خطچین مشخص شده است، انتخاب میشود. طبق تعریف جابجاییهایی عمودی،  $\Delta z$ و عرضی،  $\Delta x$  مرز صفحه جت به دست میآیند. برای سرعت عقبنشینی جت داریم که:

$$V_R = \frac{\Delta x}{\tau} \tag{5}$$

که در این رابطه،  $\tau$  مدت زمانی است که مرز جت به اندازه  $\Delta x$  جابجا شده است. برای به دست آوردن  $\tau$  از سرعت خروجی جت استفاده می شود. با این فرض که سرعت عمودی جت در طول آن ثابت باقی می ماند و بر اثر نیروی گرانش تغییر نمی کند، می توان نوشت که:

$$\tau = \frac{\Delta z}{V_j} \tag{V}$$

باید اشاره شود که با توجه به بالا بودن اینرسی طولی جت و بالا بودن عدد فرود، فرض ثابت ماندن سرعت خروجی جت معتبر است. نهایتاً با به دست آمدن au میتوان سرعت عقبنشنی جت را محاسبه کرد. باید اشاره شود که برای هر شرایط جریان، این فرآیند برای ۱۲۰۰ عکس انجام شده و مقدار نهایی از میانگین آنها به دست آمده است.



شکل ۱۳: طول همگرایی بدون بعد برای جتهای مایع دو بعدی با ضرایب منظری متفاوت

Fig. 13. Dimensionless convergence length of two-dimensional liquid jets with different aspect ratios



شکل ۱۴: روش محاسبه سرعت عقبنشینی جتهای مایع دو بعدی Fig. 14. Method of retraction velocity calculation of two-dimensional liquid jets

جتها با افزایش سرعت جت به صورت خطی افزایش پیدا می کند. از طرفی، شیب افزایش طول همگرایی کاملاً به ضریب منظری هر انژکتور وابسته است، به گونهای که برای جت TD دارای کمترین شیب و برای جت TD دارای بیشتر شیب است. به عبارت دیگر با افزایش ضریب منظری یک جت دو بعدی، طول همگرایی آن با آهنگ بیشتری افزایش مییابد. همچنین، باید اشاره شود که با افزایش سرعت خروجی جت، نیروی اینرسی جت افزایش یافته و متعاقباً قدرت تقابل آن با نیروی کشش سطحی نیز افزایش مییابد. همین امر سبب میشود که نیروی کشش سطحی نیز افزایش مییابد. همین در مدت زمان بیشتری رخ میدهد که در نتیجه طول همگرایی صفحه جت نیز افزایش مییابد. با بدون بعد کردن طول همگرایی صفحه



شکل ۱۶: سرعت عقبنشینی بدون بعد جتهای مایع دو بعدی با ضرایب منظری متفاوت



نکرده است، سرعت عقبنشینی جت نیز رفتار ثابتی بروز دهد. با استفاده از نتایج به دست آمده برای سرعت عقبنشینی بدون بعد جتهای دو بعدی میتوان به رابطه (۸) دست پیدا کرد که در آن سرعت جت خروجی،  $V_j$  بر حسب متر بر ثانیه وارد میشود. در این سرعت جت خروجی، نرایر با برابطه تجربی خطای استاندارد و ضریب تشخیص به ترتیب برابر با ۱۹۵۸ و ۱۹۹۶ به دست آمده است.

$$\frac{V_R}{V_j} = 0.65 V_j^{-1.226}$$
 (A)

### ۴–نتیجهگیری

در این پژوهش، ساختار جریان جتهای مایع دو بعدی که به درون محیط ساکن تزریق شدهاند، به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. به کمک روش عکسبرداری سایهنگاری و با کمک دوربین سرعت بالا، فیزیک جریان جت مایع آشکارسازی و ثبت شده است. ااز سه انژکتور با ضخامتهای یکسان ۳۵/۰ میلیمتر و ضرایب منظری ۳۰، ۶۰ و ۹۰ برای تولید جریان جت دو بعدی استفاده شده است. به کمک تصاویر آشکارسازی، برای اولین بار چهار رژیم شده است. به کمک تصاویر آشکارسازی، برای اولین بار چهار رژیم شامل ۱) رژیم قطره چکان، ۲) رژیم ستونی، ۳) رژیم مثلثی و ۴) رژیم حفرهای میباشند. با استفاده از کدهای پردازش تصویر توسعه داده شده، پارامترهای مختلف صفحه مایع جت دو بعدی همچون طول همگرایی، زاویه همگرایی و سرعت عقبنشینی به صورت کمّی



شکل ۱۵: سرعت عقبنشینی جتهای مایع دو بعدی با ضرایب منظری متفاوت

Fig. 15. Retraction velocity of two-dimensional liquid jets of different aspect ratios

هر گاه که نیروی کشش سطحی بیشتر باشد، صفحه جت سریعتر عقبنشینی می کند و سرعت عقبنشینی آن بالا است. اما با افزایش سرعت جت، اینرسی ایجاد شده در مقابل کشش سطحی عمل کرده و سرعت عقبنشینی جت کاهش پیدا می کند. این رفتار به خوبی در شکل ۱۵ مشاهده می شود. در این شکل تغییرات سرعت عقبنشینی صفحه جت با سرعت جت خروجی، برای هر سه انژکتور رسم شده است. در سرعتهای پایین که نیروی کشش سطحی غالب است، سرعت عقبنشینی جت بالا می باشد اما با افزایش سرعت جت و غالب شدن نيروى اينرسى، سرعت عقبنشينى صفحه جت رفته رفته کاهش یافته و به یک مقدار تقریباً ثابت میل می کند. این مقدار ثابت حدوداً برابر با ۰/۵۶ متر بر ثانیه میباشد. چنانچه دیده میشود در این نمودار نوسان هایی وجود دارد که امکان تحلیل دقیق تغییرات سرعت عقبنشینی را دشوار می کند. با بی بعد کردن سرعت عقبنشینی جت با سرعت جت خروجی، می توان رفتار آن را بهتر بررسی کرد. در شکل ۱۶ نتیجه این بی بعدسازی آورده شد است. مشاهده می شود که سرعت عقبنشینی بدون بعد یک رفتار کاهشی کاملاً یکنوا دارد. همچنین نتایج حاصله از هر سه انژکتور کاملاً بر روی هم منطبق شدهاند که نشان میدهد سرعت عقبنشینی جت نیز کاملاً مستقل از ضریب منظری می باشد. در واقع با توجه به اینکه سرعت عقب نشینی جت توسط کشش سطحی و اینرسی کنترل می شود، می توان انتظار داشت که تا زمانی که ضخامت جت یا خواص مایع تزریقی تغییر vertically in the atmosphere, Journal of non-newtonian fluid mechanics, 24(1) (1987) 11-30.

- [11] C.K. Aidun, Mechanics of a free-surface liquid film flow, Journal of applied mechanics, 54(4) (1987) 951-954.
- [12] J. Ramos, Planar liquid sheets at low Reynolds numbers, International journal for numerical methods in fluids, 22(10) (1996) 961-978.
- [13] G. Coppola, F. De Rosa, L. de Luca, Surface tension effects on the motion of a free-falling liquid sheet, Physics of Fluids, 25(6) (2013) 062103.
- [14] M. Song, G. Tryggvason, The formation of thick borders on an initially stationary fluid sheet, Physics of Fluids, 11(9) (1999) 2487-2493.
- [15] G. Sünderhauf, H. Raszillier, F. Durst, The retraction of the edge of a planar liquid sheet, Physics of Fluids, 14(1) (2002) 198-208.
- [16] N. Rizk, A. Lefebvre, The influence of liquid film thickness on airblast atomization, Journal of Engineering for Power, 102(3) (1980) 706-710.
- [17] A. Mansour, N. Chigier, Dynamic behavior of liquid sheets, Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, 3(12) (1991) 2971-2980.
- [18] I. Carvalho, M. Heitor, D. Santos, Liquid film disintegration regimes and proposed correlations, International journal of multiphase flow, 28(5) (2002) 773-789.
- [19] A. Lozano, F. Barreras, C. Siegler, D. Löw, The effects of sheet thickness on the oscillation of an air-blasted liquid sheet, Experiments in fluids, 39(1) (2005) 127-139.
- [20] I. Oshima, A. Sou, Longitudinal oscillation of a liquid sheet by parallel air flows, International Journal of Multiphase Flow, 110 (2019) 179-188.
- [21] A. Jaberi, M. Tadjfar, Flow Characteristics of Water Jets Discharging from Rectangular and Elliptical Injectors, in: ASME 2018 5th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting, American Society of Mechanical Engineers, 2018, pp. V003T018A001.
- [22] a. jaberi, M. Tadjfar, A. Sheidani, Experimental Comparison of Breakup and Flow Characteristics of Rectangular and Elliptical Water Jets, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, (2018) (In Persian).

بررسی شد. مقایسه نتایج به دست آمده از انژکتورهای مختلف نشان داد که به دلیل یکسان بودن ضخامت جتها، زاویه همگرایی و سرعت عقبنشینی جتها یکسان است. از طرفی نشان داده شد که طول همگرایی صفحه مایع با افزایش ضریب منظری افزایش پیدا میکند. همچنین، با بی بعد کردن طول همگرایی، رفتار یکسانی برای هر سه انژکتور به دست آمد. نهایتاً، برای توصیف پارامترهای مختلف صفحه مایع و به کمک نتایج به دست آمده، روابطی تجربی ارائه شده است.

مراجع

- X. Hu, A. Jacobi, The intertube falling film: Part 1— Flow characteristics, mode transitions, and hysteresis, Journal of heat transfer, 118(3) (1996) 616-625.
- [2] P. Barq, J. Haudin, J.F. Agassant, H. Roth, P. Bourgin, Instability Phenomena in Film Casting Process: Experimental and Numerical Approaches, International Polymer Processing, 5(4) (1990) 264-271.
- [3] B. Stapper, W. Sowa, G. Samuelsen, An experimental study of the effects of liquid properties on the breakup of a two-dimensional liquid sheet, in: ASME 1990 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, American Society of Mechanical Engineers, 1990, pp. V003T006A032.
- [4] S.J. Weinstein, K.J. Ruschak, Coating flows, Annu. Rev. Fluid Mech., 36 (2004) 29-53.
- [5] N. Dombrowski, R. Fraser, A photographic investigation into the disintegration of liquid sheets, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 247(924) (1954) 101-130.
- [6] H. Squire, Investigation of the instability of a moving liquid film, British Journal of Applied Physics, 4(6) (1953) 167.
- [7] N. Dombrowski, W. Johns, The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets, Chemical Engineering Science, 18(3) (1963) 203-214.
- [8] D. Brown, A study of the behaviour of a thin sheet of moving liquid, Journal of fluid mechanics, 10(2) (1961) 297-305.
- [9] N. Clarke, Two-dimensional flow under gravity in a jet of viscous liquid, Journal of Fluid Mechanics, 31(3) (1968) 481-500.
- [10] K. Adachi, Laminar jets of a plane liquid sheet falling

بی موجعه محمد ا