



## شبیه سازی عددی شکست جت مایع برای اریفیس های بیضوی با نسبت منظری متفاوت

محمدرضا مراد<sup>1\*</sup>، محمد مهدی نصیری<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

\* تهران، صندوق پستی 1458889694، morad@ae.sharif.edu

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 خرداد 1394

پذیرش: 06 مرداد 1394

ارائه در سایت: 27 مرداد 1394

کلید واژگان:

شکست جت مایع

طول شکست جت

دهانه بیضوی

پدیده تغییر محور

حل عددی

### چکیده

در این پژوهش شبیه سازی عددی تزریق جت مایع بیضوی در هوای ساکن، از طریق دهانه های بیضوی با نسبت منظری متفاوت برای بازه اعداد وبر متفاوت در رژیم جریان ریلی صورت گرفته است. برای انجام شبیه سازی ها از یک حلگر که از ترکیب روش حجم سیال برای شبیه سازی جریان و مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ برای شبیه سازی آشفتگی بهره می برد، استفاده شده است. برای مدل کردن پدیده تغییر محور و یافتن طول شکست مناسب برای هر نوع دهانه، از روش اصلاح دینامیک شبکه استفاده شده است. نتایج بر مبنای مطالعات تجربی و عددی اخیر پایه گذاری و با این مطالعات صحت سنجی شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش عدد وبر از 20 تا نزدیکی 300، افزایش طول شکست جت حاصل شد، اما با بیضی تر شدن دهانه ورودی، طول شکست جت کاهش یافت. این اختلاف در هندسه با نسبت منظری متغیر بین 0/25 تا 0/66 تعریف شد. با کاهش نسبت منظری جت ها، قطرات یکنواخت تری در مراحل پس از شکست جت بدست می آید به نحوی که در اریفیس های بیضوی با نسبت منظری کم، قطرات ماهواره ای در جریان حضور نداشتند، در حالی که این قطرات به عنوان بخش جدایی ناپذیری شکست جت دایروی شناخته شده هستند.

## Numerical Simulation of the Liquid Jet Breakup for Elliptical Orifices with Different Aspect Ratios

Mohammad Reza Morad\*, Mohammad Mahdi Nasiri

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

\* P.O.B. 1458889694 Tehran, Iran, morad@ae.sharif.edu

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 07 June 2015

Accepted 28 July 2015

Available Online 18 August 2015

### Keywords:

Liquid jet Breakup

Breakup Length

Elliptical Orifices

Axis-switching Phenomena

Numerical Analysis

### ABSTRACT

In this research, a numerical simulation of liquid jet ejecting from elliptical orifices into gaseous phase with different aspect ratios at Rayleigh regime is performed. The volume of fluid (VOF) method and large eddy simulation are used to simulate the liquid interface dynamics and the jet breakup utilizing the OpenFoam software. In order to simulate the axis-switching phenomenon and jet breakup length, the dynamic mesh refinement is used for all the examined cases. The results, which are validated with recent experimental and numerical works, indicate that the jet breakup length increases by raising the Weber number from 20 to about 300. Also, it is shown that the jet breakup length decreases as the aspect ratio of orifices declines from 0.66 to 0.25. Finally, it is observed that for the orifices with lower aspect ratios, jet breaks into droplets with uniform sizes with almost no satellite droplets which always present in the circular jet breakup.

### 1- مقدمه

جت است. یکی از مهمترین طبقه بندی ها براساس تعاریف آنسرج [2] برای نیروهای موثر بر این نوع جریان ها است. طبق تعریف او نیروهای موثر بر سیال شامل اینرسی  $\rho L^2 V^2$ ، تنش سطح  $\sigma L$ ، لزجت  $\mu L V$  و جاذبه  $\rho L^3 g$  هستند که  $L$  بیانگر طول مشخصه جت (در مسئله ما قطر نازل)،  $V$  میانگین سرعت محوری،  $g$  شتاب جاذبه،  $\rho$  چگالی،  $\sigma$  تنش سطح و  $\mu$  لزجت دینامیک هستند. تقسیم بندی نهایی رژیم های جریان نهایتاً براساس نسبت بدون بعد این نیروها و با کمک مقادیر عددهای رینولدز  $Re = \frac{\rho V L}{\mu}$  و وبر  $We = \frac{\rho V^2 L}{\sigma}$  آنسرج  $Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma L}}$  و فرود  $Fr = \frac{V^2}{gL}$  صورت گرفته است. اولین تحقیقات بر روی جت مایع توسط ساوارت [3] انجام شد. مطالعات او مشخص کرد که طول شکست به سرعت و قطر جت وابسته است. پس از او پلاتو [4] اولین

اسپری ها به طور گسترده ای در کاربردهای مختلف صنعتی از قبیل پوشش، اسپری خنک کننده، موتورهای احتراقی، صنایع داروسازی و چاپگرها [1] استفاده می شوند. در میان تمام انواع اسپری، اریفیس های ساده به طور گسترده ای به دلیل سادگی و سهولت ساخت آنها مورد استفاده قرار می گیرند. این ورودی ها قابلیت ایجاد اشکال مختلف جت در هندسه های داخلی خود را دارند که معمول ترین نوع آن ها جت دایره ای است که این مدل با این که بیش از یک قرن مورد مطالعه قرار گرفته است؛ هنوز مجهولات بسیاری در مورد آن وجود دارد. یکی از مهمترین مسائلی که برای بررسی جت های مایع مطرح است، رژیم های این نوع جریان و پارامترهای موثر بر

Please cite this article using:

M. R. Morad, M. M. Nasiri, Numerical Simulation of the Liquid Jet Breakup for Elliptical Orifices with Different Aspect Ratios, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 341-352, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

سررشته داری [12] در زمینه ی شبه سازی اثرات سایز اریفیس ها و نیز سرعت جت بر روی طول شکست جت مایع دایروی انجام شده است. طبق تحقیق آن ها، در رژیم ریلی هر چه بر سرعت جت افزوده شود و یا سطح مقطع آن افزایش یابد، طول شکست جت افزایش خواهد یافت.

یکی از اولین مطالعات در زمینه اثرات هندسه اریفیس بر روی جت مایع، تحقیق هوسین و هوسین [13] است که به بررسی اثر اریفیس های غیر دایروی بر شکست جت پرداختند. طبق نتایج این تحقیق، شکل بیضوی اریفیس ورودی بیشترین تاثیر را بر مشخصه های جت از جمله طول شکست جت نسبت به سایر اریفیس ها می گذارد. با این وجود تحقیقات به روزی در مورد جت با اریفیس های مستطیلی و مثلثی انجام شده است. کنکاچباو [14] مطالعاتی در مورد پدیده تغییر محور در جت های با سطح مقطع مستطیلی انجام داد که حاکی از عدم تطابق با نتایج حاصل از محاسبات تئوری برای جریان غیرلزج بود. یکی از آخرین مطالعات انجام شده در این زمینه مربوط به نگید [15] است که در آن اثرات نسبت منظری متفاوت بر روی شکست جت برای جت های با سطح مقطع مستطیلی انجام گرفته است.

تحقیقات در زمینه جت های با اریفیس بیضوی بیشتر به پژوهش های تئوری و ریاضی محدود شده است و مطالعات اندکی در زمینه عددی و تجربی در این زمینه صورت گرفته است. تحلیل تئوری این گونه جت ها با کمک مطالعات ناپایداری جت صورت می گیرد. دیتیاکین [16] یک معادله انتقال زمانی برای اغتشاشات متقارن استخراج نمود. در پژوهش او از اثرات جاذبه و چگالی گاز صرف نظر شده بود و ناپایداری جت مایع بیضوی در گاز غیرلزج مورد بررسی قرار گرفته بود. بچتل [17] با کمک یک مدل یک بعدی و استفاده از روش گالرکین یک روش انتگرال گیری برای معادلات ناویر استوکس روی سطح مقطع جت معرفی نمود. سپس با کمک تحلیل تئوری اثرات جاذبه و لزجت را بررسی نمود [18].

تحقیق دیگر مطالعات کالک و نقدی [20,19] بود که با وارد کردن اثرات تنش سطح در معادلات یک بعدی کسرات<sup>1</sup> اقدام به به دست آوردن سطح مشترک جت کردند. مطالعه دیگری توسط امینی و دولت آبادی [21-23] انجام گرفت که در آن معادلات یک بعدی برای ناپایداری زمانی و مکانی برای جت بیضوی لزج بدست آمد. در این تحقیقات، نرخ رشد اختلالات برای شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت. آن ها همچنین معادلاتی را برای پیش بینی پدیده تغییر محور و طول شکست جت بیضوی ارائه نمودند. ضمن این که آن ها آزمایشات تجربی برای بدست آوردن طول شکست و پدیده تغییر محور بر روی جت های بیضوی انجام دادند که با نتایج حاصل از مطالعات تئوری آن ها در مورد نرخ رشد اغتشاشات در جت های بیضوی مطابقت داشت. در زمینه تحقیقات تجربی نیز می توان از مطالعات وانگ و فانگ [24] نام برد که طول شکست جت مایع را به ازای اریفیس های غیردایروی مورد بررسی قرار دادند. طبق مطالعات آن ها، جت های با سطح مقطع مستطیلی طول شکستی کمتر از طول شکست جت با اندازه سطح مقطع یکسان که از اریفیس دایروی خارج می شود، دارند. یکی از مهمترین مطالعات تجربی دیگری که در این زمینه جت های بیضوی صورت گرفته است، آزمایشات کاسیپا [25] است که اقدام به بررسی پدیده تغییر محور و تغییرات طول شکست در جت بیضوی برای سیال آب و ترکیب آب- گلیسرول نموده است. بر این اساس با کاهش نسبت منظری برای دهانه اریفیس، جت جریان در رژیم ریلی ناپایدارتر شده و طول شکست آن کاهش می یابد.

مطالعات را بر روی پایداری جت مایع استوانه ای انجام داد. براساس تحقیقات پلاتو، ریلی [5] تئوری پایداری خطی را با صرف نظر از اثرات لزجت آیرودینامیک منتشر نمود. او صرفا با در نظر گرفتن نیروهای مویبندی، نتیجه گرفت که جت زمانی ناپایدار است که تحت تاثیر اغتشاشات متقارن با طول موج بزرگتر از محیط جت قرار گیرد. ریلی همچنین تحقیقات زیادی در مورد پایداری جت لزج انجام داد و اثرات لزجت و تنش سطح را مورد بررسی قرار داد. بعد از او وبر [6] با گسترش تحقیقات ریلی توانست یک تئوری برای جریان های لزج با سرعت کم ارائه دهد که در آن، لزجت عامل میرا کننده اغتشاشات بود. در سال های اخیر هم احمد و همکاران [8,7] مطالعاتی را در مورد اثرات لزجت بر روی مشخصه های جریان های کم سرعت داشته اند. لازم به ذکر است که تمامی مطالعات بالا بر روی جریان جت در سرعت های کم بوده اند. این در حالی است که در جریان های با سرعت بالاتر، عوامل موثر بر جریان تغییر می کنند. طبق نتایج تحقیقات ریتز [9]، نیروهای آیرودینامیکی عامل ناپایداری در رژیم های جریان با سرعت بالا هستند. نهایتا و بر اساس این مطالعات رژیم های جریان طبقه بندی گردیده است. دموجل [10] طبقه بندی رژیم های مختلف جریان را برحسب عدد وبر و عدد آنسرج و نسبت چگالی گاز به مایع  $Q = \frac{\rho_g}{\rho_l}$  بیان نمود که در جدول 1 قابل مشاهده است. بر اساس یک تعریف، طول شکست جت عبارت است از فاصله طولی محور جت از مرکز نازل که در آن شعاع جت سیال برای اولین بار به صفر می رسد.

رژیم های جریان که در جدول 1 آمده است عبارتند از رژیم چکیدن که در اعداد وبر خیلی کم اتفاق می افتد، رژیم ریلی که در آن تنش سطحی نقش عمده ای را در ناپایداری و شکست جت ایفا می کند، رژیم باد القایی اول که در آن اثرات نیروهای آیرودینامیکی نیز با اهمیت می شود و رژیم های باد القایی دوم و متمیزه که اثرات آیرودینامیکی در شکست جت غالبتر بوده و تشکیل قطرات ریزتر در این رژیمها صورت خواهد گرفت. با وجود تحقیقات فراوان هنوز مکانیزم فروپاشی مایع به خوبی درک نشده است و عواملی مانند کاویتاسیون در داخل نازل، جریان آشفته داخل نازل و در هنگام خروج از آن، هندسه داخلی نازل مانند نسبت طول به قطر نازل، مشخصات سرعت در خروج از نازل و فشار محیط [1] به عنوان موارد موثر بر شکست جت در منابع مختلف نام برده می شوند. با توجه به پارامترهای موثر بر طول شکست، مطالعات مختلفی بر روی هر یک از این پارامترها صورت گرفته است و یکی از این پارامترها شکل سطح مقطع ورودی جت است.

در داخل کشور نیز در زمینه جت های مایع دایروی تحقیقات خوبی انجام شده است. خسروی و انصاری [11] مطالعاتی را در مورد جت خروجی از نازل انجام داده اند و در آن تاثیرات پارامترهای مختلف جریان بر طول شکست جت مورد ارزیابی واقع شده است. طبق این نتایج لزجت، عامل میرا کننده اغتشاشات است. ضمن اینکه افزایش سرعت هوای محیط اطراف موجب کاهش طول شکست جت می گردد. علاوه بر این افزایش اندازه اریفیس موجب افزایش اندازه طول شکست خواهد شد. مطالعه دیگر توسط فرهنگ و

جدول 1 رژیم های حاکم بر جریان برحسب بازه عدد وبر و آنسرج دموجل [10]

منطقه	رژیم حاکم	بازه رژیم مورد نظر
الف	چکیدن	$We < 4$
ب	ریلی	$We > 4, QWe < 0.6 + 2.5 Oh^{0.5}$
پ	باد القایی اول	$0.6 + 2.5 Oh^{0.5} < QWe < 6.5$
ت	باد القایی دوم	$6.5 < QWe < 20.15$
ج	اتمیزه	$QWe > 20.15$

1- Cosserat equations

فرکانس را در غالب عدد بدون بعدی به نام عدد موج مورد بررسی قرار می دهند.

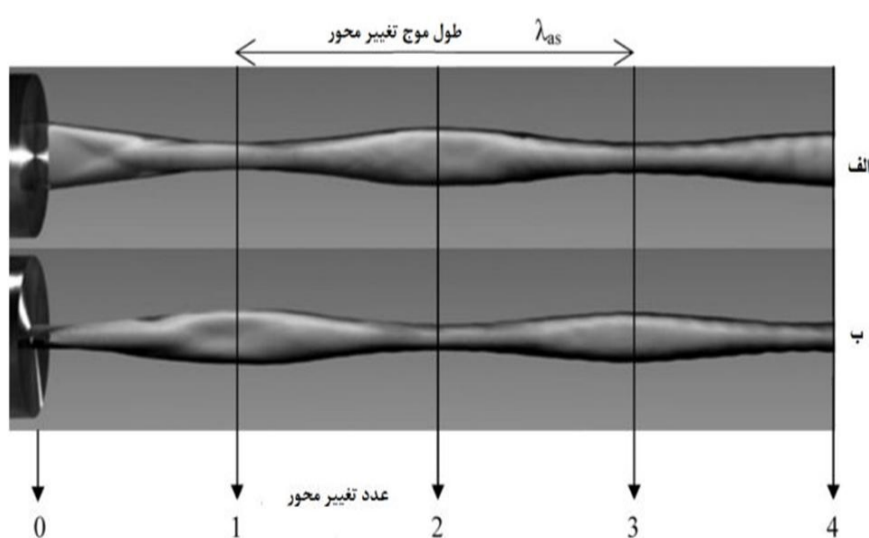
پدیده تغییر محور، پدیده ای مختص جت های به وجود آمده از اریفیس های بیضوی و یا شبه بیضوی می باشد که در آن با توجه به پایداری بودن سطح مقطع دایروی نسبت به سطح مقطع بیضوی و همین طور اینرسی سیال، جای محور اصلی جت خروجی از نازل با محور فرعی به صورت نوسانی عوض می شود (شکل 1).

تمایل کشش سطح به ایجاد کمترین مقدار انرژی سطح است که همان سطح مقطع دایروی می باشد. بنابراین در مایعی که از اریفیس بیضوی خارج می شود، تغییر شکل بیضی به سمت شکل دایره خواهد بود. اما زمانی که سطح مقطع جت بیضوی به دایره تبدیل شد این فرایند متوقف نشده و با توجه به اینرسی حاصل از تغییر محورهای اصلی و فرعی بیضی به محور دایروی، این فرایند ادامه می یابد تا جایی که جای محور اصلی و فرعی با یکدیگر عوض می شود. عدد تغییر محور، شماره تکرار نقاط اوج و فرود جت بیضی (پدیده تغییر محور)، از خروجی اریفیس می باشد. طول موج تغییر محور نیز به فاصله بین دو نقطه اوج یا فرود در سطح جت گفته می شود. به عبارت دیگر، به فاصله بین دو عدد تغییر محور زوج یا دو عدد تغییر محور فرد، طول موج تغییر محور می گویند. برای درک بهتر این تعاریف می توان از شکل 1 کمک گرفت [28,25].

نسبت منظری جت بیضوی به عنوان عامل نشان دهنده تغییرات هندسه اریفیس برابر با طول محور کوچک بیضی به طول محور بزرگ بیضی، می باشد. بدین ترتیب کاهش نسبت منظری برابر با بیضی تر شدن هندسه اریفیس خواهد بود. هر چند که در مطالعه حاضر مساحت تمام اریفیس ها یکسان در نظر گرفته شده است، اما شکل هندسی اریفیس روی ضریب تخلیه نیز تاثیر می گذارد. این تاثیر در افت فشارهای مختلف برای اریفیس های دایروی، مستطیلی و بیضوی قبلا مورد بررسی قرار گرفته و اختلاف کمی را نشان می دهد که ممکن است در شرایطی بتوان این اثر را ناچیز در نظر گرفت [29].

بزرگترین مقدار دامنه محور اصلی بیضی که در اولین نقطه اوج دامنه محور اصلی بیضی بعد از خروج جت از اریفیس محاسبه می شود را  $D_{max}$  می نامیم. البته می توان این مقدار را به ازای تمامی اعداد تغییر محور نیز تعریف نمود. در این حالت قطر ماکزیمم جت عبارت است از دامنه شعاع جت در محلی که اعداد تغییر محور در آن نقاط تعریف می شوند.

نکته دیگر این که در مسئله مورد بررسی، برای بی بعدسازی تمامی موارد



شکل 1 تصویر شماتیک از تخلیه جت بیضوی از حفره ای بیضوی (الف) شکل جت با حضور روی محور اصلی (ب) شکل جت با حضور روی محور فرعی [28]

با توجه به فرضیات محدود کننده در تحلیل های تئوری، غالبا از تحلیل های عددی برای بررسی پدیده های با پیچیدگی بالا استفاده می شود. با توجه به این مسئله، از تحقیقات عددی برای شبیه سازی رفتار جت بیضوی استفاده شده است. براون و بوریس [26] مطالعاتی را صرفا برای بررسی دلیل کاهش طول شکست جت های بیضوی نسبت به طول شکست جت دایروی انجام دادند. طبق مطالعه آن ها، دلیل اصلی این کاهش طول شکست به علت حضور ناپایداری های کلونین - هلمهولتز است که توسط اریفیس بیضوی تشدید می گردد. میلر [27] نیز تحلیل هایی عددی برای بررسی اثرات اریفیس دایروی، بیضوی و مثلثی بر طول شکست انجام داد. یکی از جدیدترین تحقیق های صورت گرفته در زمینه شبیه سازی جت بیضوی مقاله فروردین و دولت آبادی [28] است که اقدام به بررسی پدیده تغییر محور و تغییرات طول شکست در جت های مختلف می نماید.

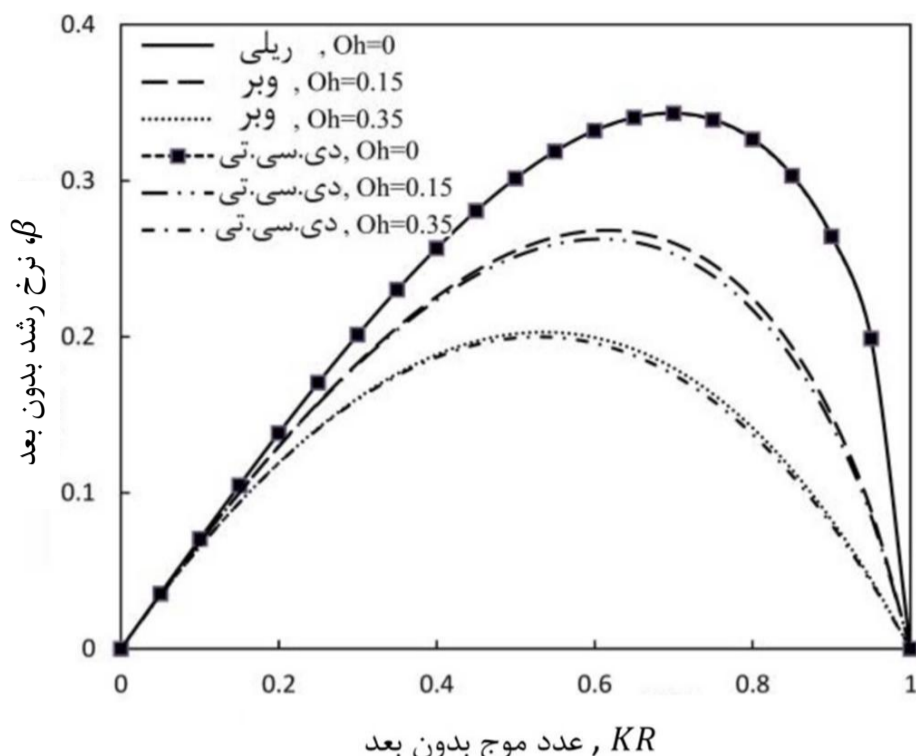
در تحقیق حاضر برای اولین بار در داخل کشور، اقدام به شبیه سازی جت های بیضوی در محیط گازی شده است که گاز محیط هوا در نظر گرفته شده است. هدف کلی ما بررسی مشخصه های جت مایع بیضوی شامل پدیده تغییر محور، تغییرات طول شکست و همچنین اندازه قطرات حاصل از شکست جت به ازای تغییر در نسبت منظری اریفیس جت بیضوی می باشد. در این مسئله، گاز دارای عدد وبر کمتر از  $0/4$  است در حالی که عدد وبر مربوط به فاز مایع دامنه ای بین 30 تا 330 خواهد داشت [28]. از کد متن باز این فوم برای شبیه سازی جریان دوفازی استفاده شده که در این کد از روش حجم سیال که با روش شبیه سازی آشفتگی ادی های بزرگ کوپل شده است، استفاده گردیده است. نتایج بدست آمده حاصل از شبیه سازی با نتایج موجود از مطالعات تجربی کاسیپ [25] و فروردین و دولت آبادی [28] صحت سنجی شده است.

پس از اطمینان از صحت نتایج بدست آمده، در ادامه نتایج جدید و بیشتری نسبت به مطالعات دولت آبادی از تحلیل عددی ارائه شده است. به این ترتیب که شکست جت و فرایند جدا شدن قطره از جت بیضوی در مقایسه با جت دایروی مورد بررسی قرار گرفته است. در قدم بعد با بررسی میزان اندازه طول محور اصلی برای اریفیس های متفاوت به ازای اعداد وبر و اعداد تغییر محور متفاوت (شکل 1)، نحوه ی میرا شدن پدیده تغییر محور مورد بررسی قرار گرفته و سپس با کمک کانتورهای سرعت و فشار، بررسی دقیق تری در مورد پدیده تغییر محور و نحوه میرا شدن این پدیده در طول جریان جت انجام شده است. نهایتا نیز با کمک اندازه قطرات حاصله از شکست جت برای اریفیس های متفاوت یکنواختی قطرات ایجاد شده مورد تحلیل قرار گرفته است. لازم به ذکر است که مطالعات در مورد مشخصه های پایانی که ذکر گردید، بسیار محدود بوده و در بعضی از آن ها، نتایج حاصل از آزمایش های تجربی تنها نتایج موجود در این زمینه می باشند و در بعضی دیگر اصولا کاری صورت نگرفته است.

## 2- تعاریف و مشخصات جت های بیضوی

در این قسمت لازم است تا قبل از هر چیز توضیحاتی در مورد جت های بیضوی و تعاریف و مشخصات خاص آن داده شود.

یکی از مواردی که در توجیه شکست جت های مایع ذکر می گردد، حضور اغتشاشاتی اولیه در جریان است که با پیشروی جت مایع، با نرخ رشد خاصی رشد کرده و زمانی که اندازه دامنه آن ها با شعاع جت برابر گردید، منجر به شکست می شوند. نرخ رشد این اغتشاشات متغیر می باشد و بسته به فرکانس این اغتشاشات دارد. در تحقیقات غالبا برای سادگی در تحلیل ها، اثرات



شکل 3 نرخ رشد بدون بعد بر حسب عدد موج بدون بعد برای جریان لزوج و غیر لزوج [21]

### 3- روش حل و معادلات حاکم

برای شبیه سازی جریان جت از یکی از حلگرهای کد متن باز این فوم استفاده شده است. این حلگر مختص شبیه سازی جریان چندفازی سه بعدی تراکم ناپذیر به کمک روش حجم سیال است. تنش سطح بین هوا و آب نیز برابر با  $0/07 \frac{N}{m}$  است و سیال آب نیوتنی فرض شده است. در روش حجم سیال مقداری برای نسبت کسر مایع به گاز در هر لحظه اختصاص می یابد. برای مثال اگر سلول کاملاً حاوی مایع باشد، آن گاه کسر حجمی آن 1 و اگر کاملاً حاوی گاز باشد، کسر حجمی آن صفر خواهد بود و در غیر این صورت مقداری بین 1 و صفر را خواهد پذیرفت. نسبت کسر مایع به گاز ( $\gamma$ ) نیز به صورت شرط مرزی و شرط اولیه در نظر گرفته شده است. مقدار اولیه این نسبت برای ورودی برابر با 1 و برای تمامی نقاط دیگر برابر با صفر است. معادلات حاکم، معادلات ناویر استوکس شامل معادله پیوستگی و مومنتوم هستند که  $\mu, \vec{v}, \rho$  و  $\vec{g}$  معرف چگالی، سرعت، فشار، لزجت، و جاذبه هستند (روابط 1-6). مقدار جاذبه برای مسئله ما برابر با مقدار  $9/8 \frac{m}{s^2}$  در نظر گرفته شده است.

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

$$\rho = \rho_l + \rho_g(1 - \gamma) \quad (3)$$

$$\mu = \mu_l + \mu_g(1 - \gamma) \quad (4)$$

$$\vec{F} = \sigma \kappa \nabla \gamma \quad (5)$$

$$\kappa = -\nabla \cdot \left( \frac{\nabla \gamma}{|\nabla \gamma|} \right) \quad (6)$$

لازم به ذکر است که  $\vec{F}$  نیروی تنش سطح است که تابعی از تنش سطح و انحنای سطح و گرادیان کسر حجمی است. ضمناً با توجه به استفاده از روش حجم سیال معادله بقای کسر حجمی نیز به معادلات اضافه می شود و با توجه به نیاز ما برای بدست آوردن دقیق مرز مشترک، از معادله اصلاحی کسر حجمی که به آن معادله تراکم مصنوعی نیز می گویند، استفاده شده است (رابطه 7).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma) + \nabla \cdot (\gamma \vec{v}) + \nabla \cdot [\vec{v}_r \gamma (1 - \gamma)] = 0 \quad (7)$$

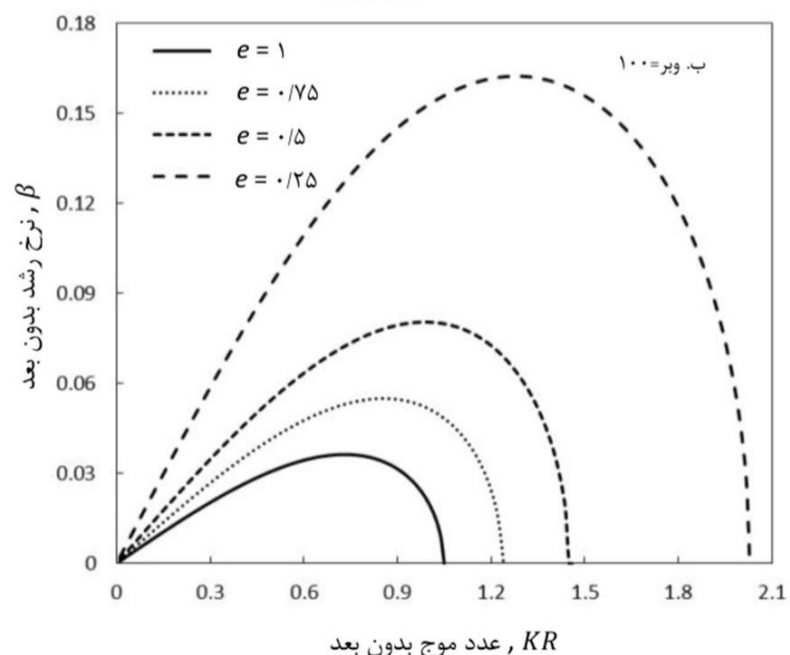
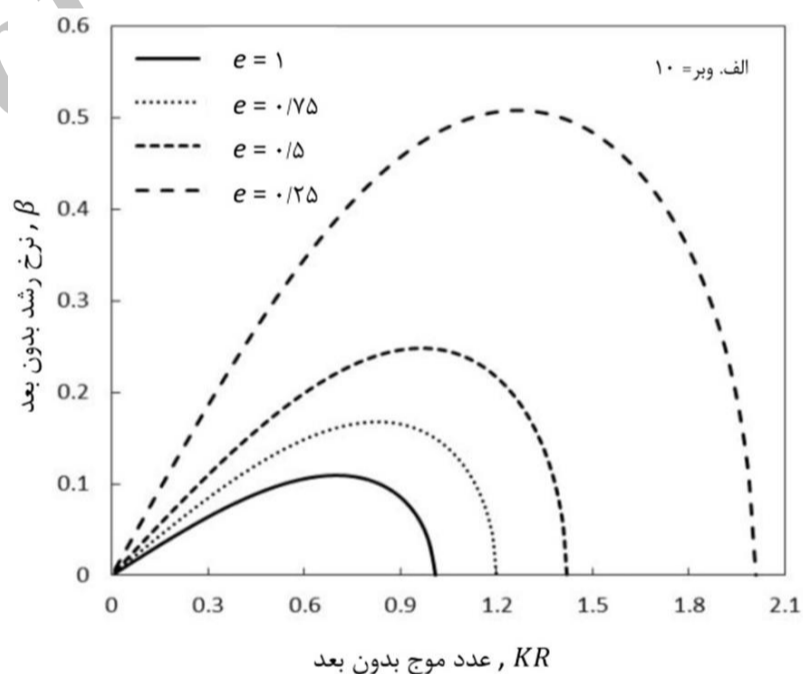
عبارت  $\vec{v}_r$  سرعت متراکم نام دارد و طبق رابطه (9) در ناحیه مرز

طول و یا تعریف اعداد بی بعد مخصوص جریان جت مایع از قطر معادل جت به عنوان ضریب بی بعد ساز استفاده شده است.

شکل های 2 و 3 نمایشگر نتایج مطالعات بر روی اغتشاشات و اعداد موج جت های بیضوی می باشد. بر طبق این مطالعات که بر روی جت های غیر لزج بیضوی انجام گرفت، به ازای بیضی تر شدن اریفیس (کاهش نسبت منظری ( $e$ ) و به عبارت دیگر افزایش طول محور اصلی و کاهش طول محور فرعی بیضی)، شاهد افزایش نرخ رشد اختلالات در رژیم ریلی خواهیم بود (شکل 2). این افزایش نرخ رشد نهایتاً منجر به شکست جت مایع در فاصله ای کمتر نسبت به جت مایع حاصل از اریفیس دایروی می شود.

از طرف دیگر طبق محاسبات انجام گرفته برای به دست آوردن نرخ رشد اغتشاشات برای جت دایروی لزج و غیر لزج این مطلب مشخص گردید که در صورت اضافه نمودن لزجت به محاسبات، با وجود حضور اغتشاشات پیش بینی شده در بازه فرکانسی مناسب، مقدار حداکثر نرخ رشد اغتشاشات کاهش می یابد (شکل 3). بدین ترتیب، لزجت به عنوان عامل میرا کننده اغتشاشات شناخته می شود و به تبع آن با اضافه نمودن اغتشاشات به محاسبات، طول شکست جت باید افزایش یابد.

بدین ترتیب می توان انتظار داشت که نمودارهای شکل 2 که برای جریان بیضوی غیر لزج بدست آمده اند، در صورت اضافه نمودن لزجت به مسئله، باز هم به همین شکل باقی بمانند، با این تفاوت که باید در مورد مقدار حداکثر نرخ رشد اغتشاشات، بازنگری هایی انجام داد. آن ها نهایتاً با انجام آزمایشات، نتایج تئوری خود را به صورت تجربی بدست آوردند.



شکل 2 نرخ رشد بدون بعد بر حسب عدد موج بدون بعد برای الف) عدد ویر 10 ب) عدد ویر 100 [21]

مشترک بدست می آید (رابطه 8).

$$\vec{v}_{r,f} = n_f \min \left[ C_\gamma \frac{|\varphi|}{|S_f|}, \max \frac{|\varphi|}{|S_f|} \right] \quad (8)$$

که  $C_\gamma$ ،  $S_f$ ،  $\varphi$  و  $n_f$  عبارت هستند از شار حجم، بردار سطح سلول، ضریب تراکم و شار واحد نرمال سطح که طبق رابطه (10) تعریف می گردد (رابطه 9)

$$n_f = \frac{(\nabla \gamma)_f}{|(\nabla \gamma)_f| + \delta_n} \quad (9)$$

و  $\delta_n = 10^{-5}$  در نظر گرفته شده است. مدل توربولانسی مورد استفاده نیز مدل شبیه سازی ادی های بزرگ است که در آن مدل اسماگورینسکی استفاده شده است. تانسور تنش اسماگورینسکی با کمک میانگین گیری از تعریف لزجت ادی و لزجت جنبشی اسماگورینسکی [28] بدست می آید. برای این کار از معادلات زیر استفاده می شود (روابط 10-12):

$$\tau_{SGS} = \bar{v}v - \overline{v}v \quad (10)$$

$$\tau_{SGS} - \frac{2}{3} k_{SGS} I = -\frac{\mu_{SGS}}{\rho} [\nabla v + (\nabla v)^T] \quad (11)$$

$$\frac{\partial k_{SGS}}{\partial t} + \nabla \cdot (k_{SGS} \bar{v}) = \nabla \cdot [(\vartheta + \vartheta_{SGS}) \nabla k_{SGS}] - \varepsilon - \vartheta_{SGS} \bar{S}^2 \quad (12)$$

که مقادیر  $\varepsilon$ ،  $\vartheta_{SGS}$  و  $S$  طبق روابط زیر بدست می آیند (روابط 13-15) [28].

$$\varepsilon = \Delta C_\varepsilon (k_{SGS})^{3/2}, \quad C_\varepsilon = 1.05 \quad (13)$$

$$\vartheta_{SGS} = \Delta C_k (k_{SGS})^{3/2}, \quad C_k = 0.07 \quad (14)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{2} [\nabla v + (\nabla v)^T] \quad (15)$$

معادلات ناویر استوکس به روش ضمنی و با استفاده از الگوریتم پیزو در هر گام زمانی حل شده اند. گام زمانی اولیه برابر با  $1 \times 10^{-6}$  ثانیه بوده است که توسط عدد کورانت اعلام شده اصلاح می شود. در این حل برای جلوگیری از ناپایداری حل عدد کورانت کوچکتر از 0/5 انتخاب شده است.

#### 4- هندسه و شرایط مرزی

در هندسه حاضر، شبیه سازی ها برای چند اریفیس با نسبت منظری متفاوت انجام شده است که می توان مقادیر آن ها را در جدول 2 مشاهده کرد. تعریف نسبت منظری همان گونه که پیش تر ذکر شد، عبارت است از نسبت طول محور فرعی به طول محور اصلی جت، همچنین تمامی اریفیس ها با سطح مقطع یکسان در نظر گرفته شده اند.

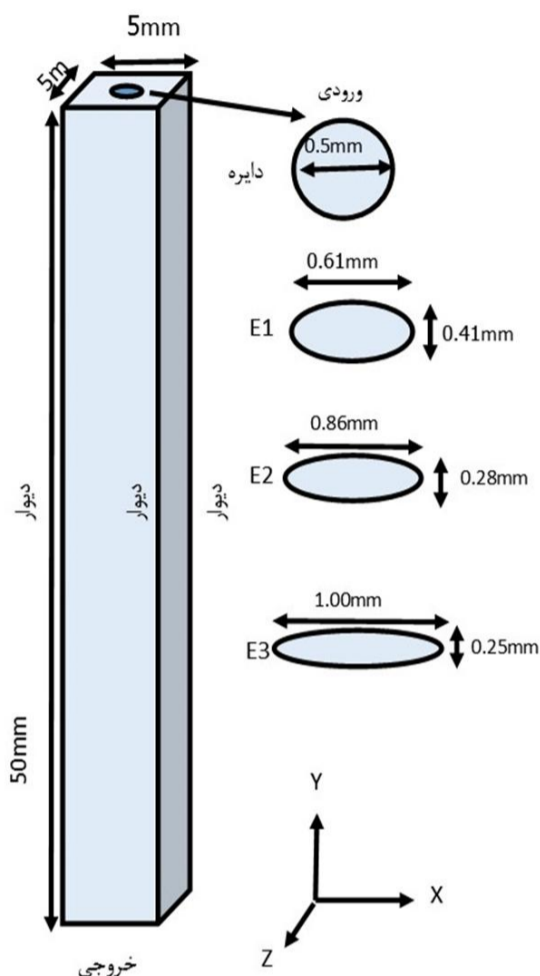
شرایط مرزی نیز عبارتند از مقدار فشار ثابت روی دیوارها و خروجی برابر با فشار اتمسفر و شرط مرزی ورودی نیز به صورت سرعت با مقدار مشخص و ثابت تعریف شده است. فشار ورودی نیز به صورت گرادیان فشار صفر تعریف شده است. ضمناً روی دیوارها با توجه به شرط عدم لغزش، شرایط سرعت صفر برقرار است. سرعت جریان ورودی نیز مقادیر مختلفی را شامل می شود که این مقادیر در جدول 3 ارائه شده است. لازم به ذکر است که در تمامی این سرعت ها، جریان در رژیم ریلی قرار دارد.

برای امکان بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی در مقایسه با نتایج تجربی کاسیاپ [25] و نتایج عددی فروردین و دولت آبادی [28] از اریفیس های با قطر معادل 0/5 میلی متر استفاده شده است. شکل 4 نشان دهنده شکل هندسه مورد استفاده به همراه اریفیس ورودی آن می باشد. مکعبی با اندازه 50×5×5 میلی متر در نظر گرفته شده است که با توجه به قطر معادل 0/5 میلی متر، نسبت طول به قطر 100×10×10 را برای هندسه مورد بررسی، نتیجه می دهد. برای گسسته سازی هندسه حل نیز از شبکه های کارتزین با فاصله اولیه 0/10 میلی متر در تمامی صفحات استفاده شده است.

مقدار انرژی جنبشی توربولانسی  $k$  نیز با کمک معادله 1 و با توجه به این نکته که شدت توربولانسی  $I$  برای ورودی مایع برابر با  $I = 15\%$  و برای

جدول 2 اریفیس های مورد بررسی به همراه ابعاد آن ها بر حسب میلی متر

نام	محور اصلی (mm)	محور فرعی (mm)	قطر معادل (mm)	نسبت منظری
E1	0/61	0/41	0/5	0/66
E2	0/86	0/28	0/5	0/33
E3	1/00	0/25	0/5	0/25



شکل 4 هندسه مسئله مورد بحث

جدول 3 سرعت های مورد استفاده در این مسئله

سرعت دهانه نازل ( $\frac{m}{s}$ )	عدد وبر مایع	رینولدز
2/1	30	1172
4	110	2245
6/9	330	3884

دیوارها برابر با  $I = 1\%$  است بدست آمده است. لازم به ذکر است که مقدار شدت توربولانسی  $I = 15\%$  مقداری است که به صورت تخمینی و برای جریانی که هنوز کامل توسعه نیافته است در نظر گرفته می شود و جریان ما همچنان آرام محسوب می شود (رابطه 16) [28].

$$k = \frac{3}{2} (V_l I)^2 \quad (16)$$

#### 5- نتایج

در این قسمت نتایج حاصل از شبیه سازی به ترتیب زیر مورد بررسی قرار می گیرد. ابتدا نتایج بدست آمده در مورد شکست جت، برای اریفیس های مختلف و در اعداد وبر مختلف مورد ارزیابی قرار می گیرد. ضمناً بررسی استقلال حل از شبکه نیز در همین قسمت انجام می شود. در گام بعد تمرکز ما بر روی پدیده تغییر محور به عنوان یک پدیده حیاتی جت های بیضوی خواهد بود. در گام نهایی قطرات حاصله از شکست جت مورد تحلیل و ارزیابی قرار خواهند گرفت.

## 1-5- شکست جت و اسقلال از شبکه

در این قسمت نتایج مربوط به طول شکست جت مایع به ازای اعداد وبر متفاوت و اریفیس های متفاوت مورد بررسی قرار خواهد گرفت. تحلیل مستقل از شبکه بودن حل نیز در این قسمت ذکر گردیده است.

شکل 5 یک نمونه از جت به دست آمده از شبیه سازی را به صورت سه بعدی نشان می دهد. تغییر محور در این نمونه به صورت سه بعدی کاملا مشخص است به طوری که با تناوب و طول موج در فضا ادامه پیدا می کند. در ادامه نوسانات جت شکسته و قطراتی از آن جدا می شود. این امر در تصویر دو بعدی از جت شکل 5، به صورت نتایج نمایش داده شده در شکل های 6 و 7 مشاهده می شود.

این نتایج نشان دهنده تصاویر حاصل از شبیه سازی جریان جت بیضوی به ازای اریفیس های متفاوت و عددهای وبر متفاوت هستند. طبق این نتایج با کم شدن نسبت منظری و افزایش بیضویت سطح مقطع شاهد مشخص تر شدن پدیده تغییر محور خواهیم بود.

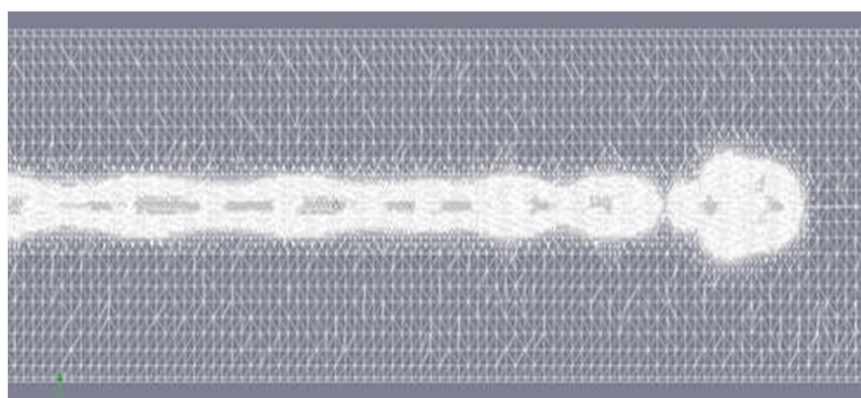
با پیش روی جت شاهد ضعیف شدن پدیده تغییر محور و میرایی آن بعد از تعدادی تکرار خواهیم بود. سپس با توجه به حضور اختلالات موجود در جریان و رشد این اختلالات نوساناتی روی سطح مشترک جت و هوا ایجاد می شود و نهایتا با رشد این اختلالات به مقدار کافی جت خواهد شکست. نکته قابل توجه این است که با توجه به حساسیت محاسبات در مرز مشترک، اصلاح دینامیک شبکه ضروری می باشد [28]. در این روش با کمک تعریف نسبت کسر حجمی اقدام به ریز کردن شبکه ها در سلول هایی که حاوی سیال

مایع (سطح مشترک) هستند نموده و از ریز نمودن سلول های گازی صرف نظر می شود که طبیعتا نیاز سخت افزاری را کاهش می دهد. طبق تعریف، ریز شدن شبکه ها در تمامی جهات محورها و به ازای  $0 < \gamma \leq 1$  انجام شده است. شکل 8 نشان دهنده یک نمونه از اصلاح شبکه مورد استفاده در این پژوهش برای  $0 < \gamma \leq 1$  می باشد.

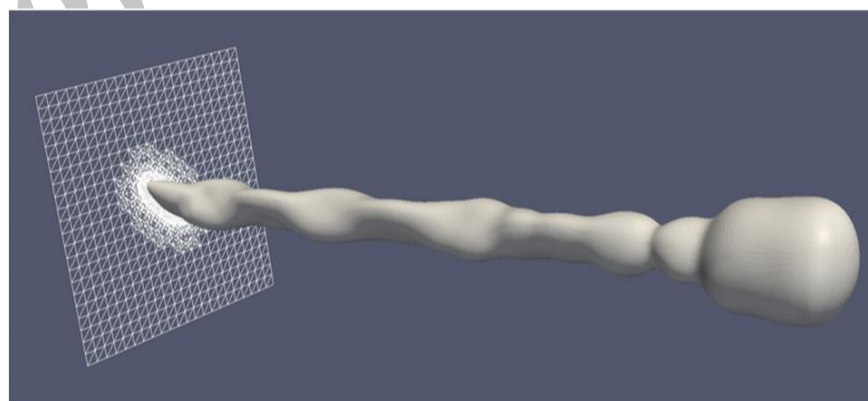
به ازای اصلاح دینامیک شبکه در سه و چهار مرحله تعداد سلول ها به ترتیب حدودا به 2 و 10 میلیون می رسد. برای بررسی اثر تعداد سلول ها بر نتایج، طول شکست بی بعد شده با قطر معادل بر حسب عدد وبر برای اریفیس E2 و به ازای مراحل مختلف اصلاح شبکه در شکل 9 رسم شده است.

با توجه به یکسان بودن مساحت سطح مقطع اریفیس ها، مقدار قطر معادل برای تمامی اریفیس ها برابر با  $D_{eq} = 0.5$  میلی متر خواهد بود. ملاحظه می شود که در مقایسه با نتایج تجربی، اصلاح شبکه با دو مرحله دارای دقت کافی نیست و یک مرحله اصلاح بیشتر شبکه، امری ضروری می باشد. از طرف دیگر اختلاف نتایج حاصل از اصلاح شبکه با سه یا چهار مرحله، دارای اختلاف اندکی با یکدیگر هستند و به ازای سه مرحله اصلاح شبکه، دقت محاسبات به مقدار مناسبی می رسد و این خود بیانگر این مطلب است که نتایج شبیه سازی بعد از سه مرحله اصلاح دینامیک شبکه، به نوعی مستقل از شبکه محاسباتی می شوند. به همین دلیل و برای کاهش نیاز سخت افزاری، اصلاح دینامیک شبکه به تعداد 3 مرحله در نظر گرفته شده است.

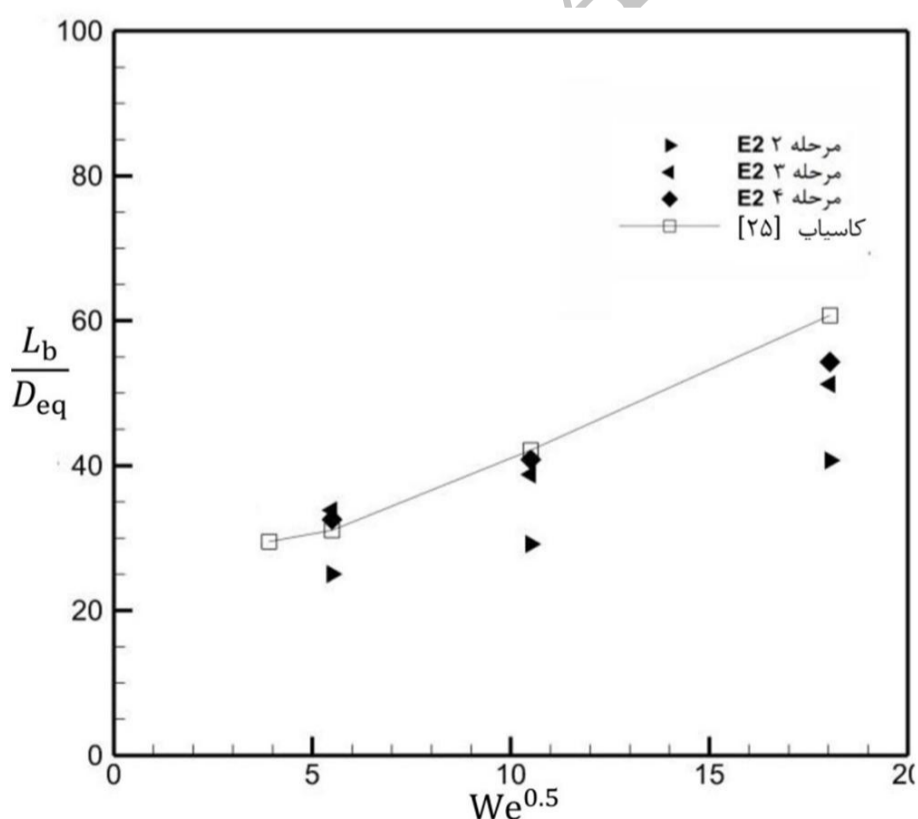
نکته دیگر این که با افزایش عدد وبر، اختلاف بین نتایج حاصل از



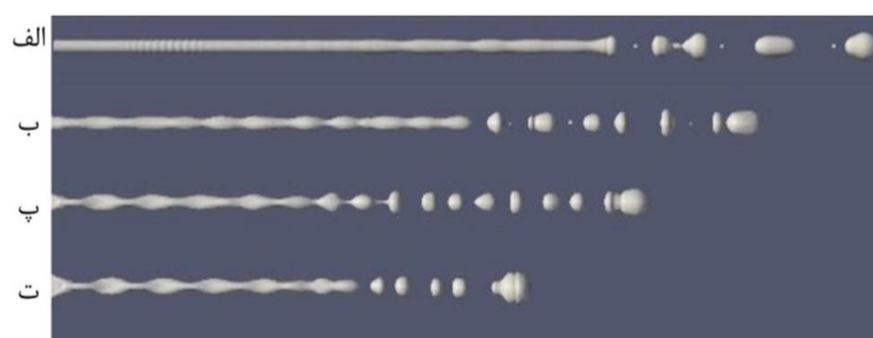
شکل 8 حوزه حل گسسته سازی شده به روش اصلاح دینامیک شبکه



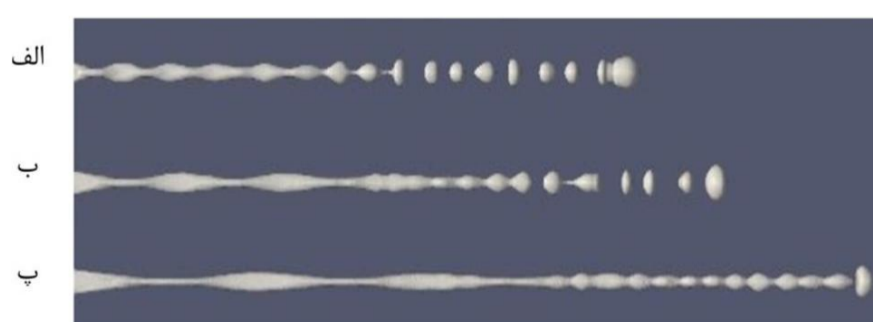
شکل 5 تصویر سه بعدی پدیده تغییر محور حاصل از شبیه سازی



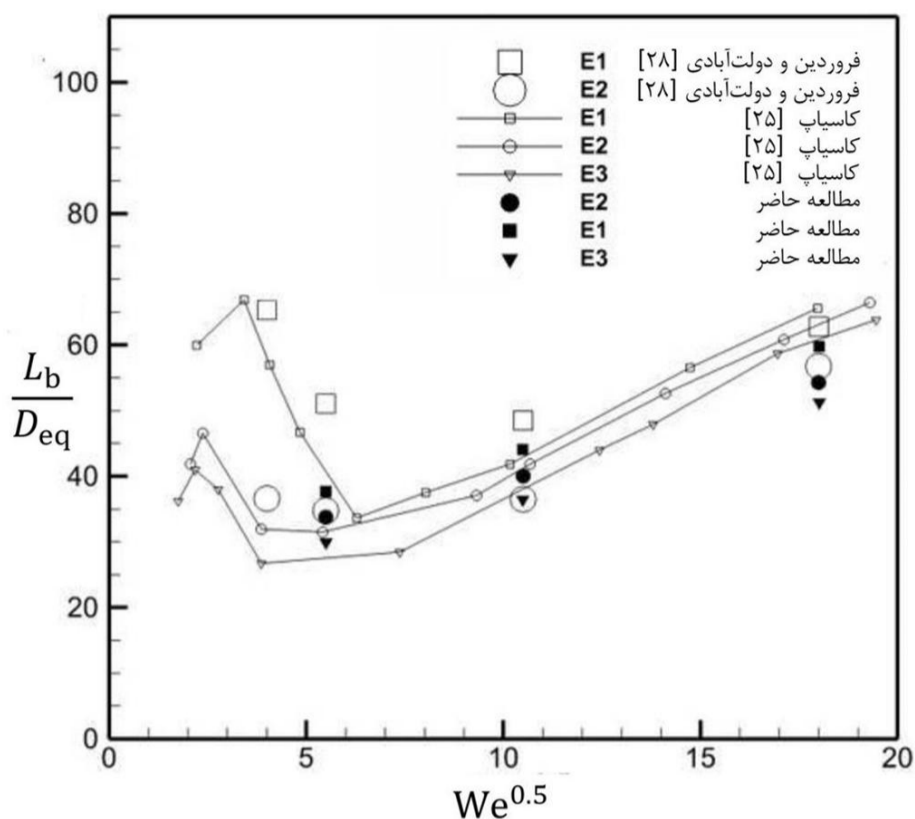
شکل 9 بررسی مستقل از شبکه بودن حل برای اریفیس E2 برای چندین مرحله اصلاح دینامیک شبکه متفاوت



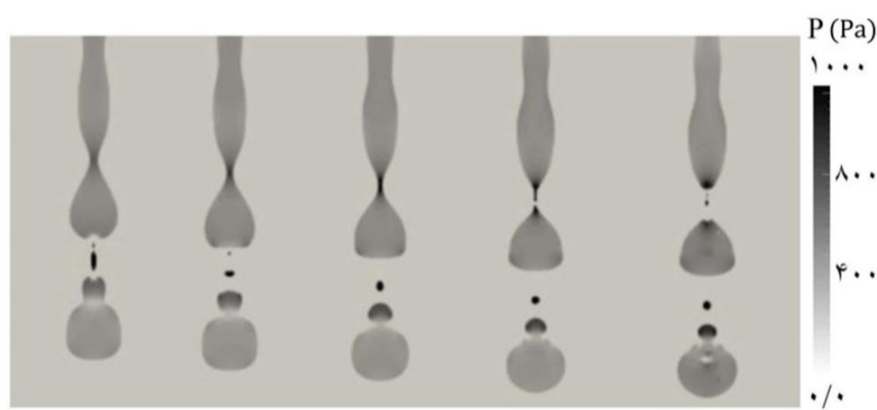
شکل 6 تصویر حاصل از شبیه سازی برای وبر 30 برای اریفیس های الف. دایروی ب. E1. پ. E2. ت. E3



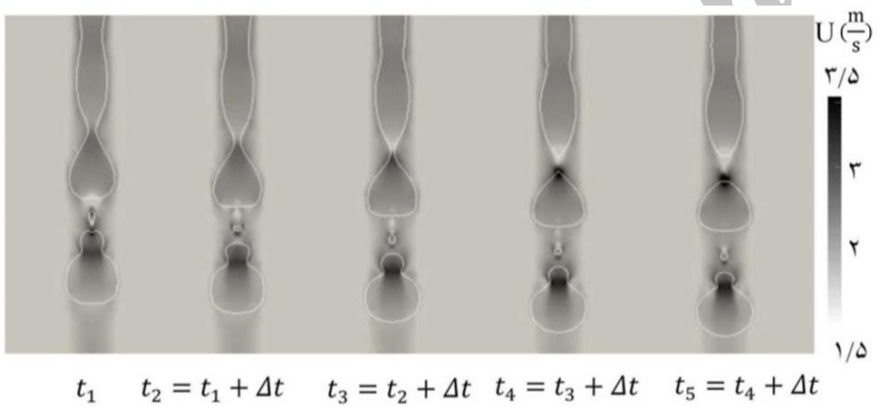
شکل 7 تصویر حاصل از شبیه سازی برای اریفیس E2 برای سه وبر متفاوت الف. عدد وبر 30. ب. عدد وبر 110. پ. عدد وبر 330



شکل 10 تغییرات طول شکست جت بر حسب عدد وبر برای اریفیس E1, E2, E3



شکل 11 کانتور فشار بر حسب پاسکال در لحظه شکست جت برای مقادیر حداکثر و حداقل فشار در هر لحظه ( $\Delta t = 10^{-4} s$ )



شکل 12 کانتور سرعت بر حسب  $\frac{m}{s}$  در لحظه شکست جت برای مقادیر حداکثر و حداکثر سرعت در هر لحظه ( $\Delta t = 10^{-4} s$ )

نتایج حاصل از شبیه سازی حاضر نیز با تحقیقات تجربی کاسیپ [25] و مطالعات عددی فروردین و دولت آبادی [28] مقایسه شده است. این افزایش طول موج نیز با توجه به کاهش اثرات تنش سطحی در وبرهای بالاتر رژیم ریلی در نظر گرفته می شود.

شکل 14 نشان دهنده تغییرات طول موج به ازای اعداد موج متفاوت برای وبر حدود 30 است. این نتایج نیز با پژوهش های تجربی و عددی مقایسه شده است. با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی طول موج تغییر محور به ازای اعداد موج اول افزایش یافته اما بعد از عدد موج دوم به مقدار ثابتی می رسد. در عدد موج اول به دلیل نزدیک بودن به دهانه اریفیس و اثرات اریفیس

شبیه سازی با نتایج تجربی بیشتر می شود. این افزایش خطا احتمالاً به علت ناپایداری هایی خواهد بود که ممکن است توسط خطاهای حل عددی اعمال گردیده باشد. البته لازم به ذکر است که در عدد وبر بالا، افزایش تعداد مراحل اصلاح شبکه به چهار مرحله، موجب افزایش دقت شبیه سازی می شود، اما با توجه به سنگینی بیش از حد محاسبات و دقت نسبتاً قابل قبول نتایج در وبر بالا و با کمک سه مرحله اصلاح شبکه، از همان سه مرحله اصلاح دینامیک شبکه در این قسمت نیز استفاده شده است.

در شکل 10 نتایج حاصل از شبیه سازی برای بررسی طول شکست به ازای اریفیس های با نسبت منظری متفاوت و به ازای اعداد وبر مختلف آمده است و این نتایج با آزمایشات تجربی کاسیپ [25] و نتایج عددی فروردین و دولت آبادی [28] مقایسه شده است. طبق تعریف طول شکست، هر چه میزان نرخ رشد اختلالات افزایش یابد شاهد کاهش طول شکست خواهیم بود. طبق نمودارهای حاصل از تحلیل ناپایداری امینی [23] هر چه نسبت منظری کاهش یابد شاهد افزایش نرخ رشد اختلالات برای جت های با سطح مقطع معادل در رژیم ریلی و باد القایی اول خواهیم بود. ضمناً با افزایش عدد وبر نیز شاهد افزایش طول شکست جت خواهیم بود. علت اصلی افزایش طول شکست، غالب بودن نیروهای تنش سطحی در رژیم ریلی برای شکست جت است.

با افزایش عدد وبر نسبت اثرات نیروهای تنش سطحی کاهش یافته و به دنبال آن نرخ رشد اختلالات کاهش می یابد که این وابستگی در نتایج تحلیل ناپایداری در شکل های 2 نیز مشاهده می شود.

طبق تعاریف، شکست جت زمانی رخ می دهد که دامنه اغتشاشات اولیه موجود در جت مایع رشد کرده و به مقداری برابر با شعاع جت برسد [23]. در این حالت نوسانات روی مرز مشترک جت به نحوی است که شاهد گلوگاه هایی در نواحی قبل از شکست جت خواهیم بود که در شکل 11 برای اریفیس E2 مشخص است. همچنین میزان فشار در ناحیه گلوگاه جت مایع بیشترین مقدار ممکن را دارد. با توجه به رشد اغتشاشات و باریکتر شدن ناحیه گلوگاه، فشار این ناحیه باز هم افزایش می یابد تا این که سرانجام منجر به شکست جت می شود.

سرعت نیز در ناحیه گلوگاه بیشترین مقدار است و با گذر زمان و کوچک تر شدن ناحیه گلوگاه این سرعت نیز افزایش می یابد. درست در لحظه شکست شاهد دو ناحیه با مقدار حداکثر و حداقل سرعت در ناحیه گلوگاهی هستیم که منجر به برهم خوردن پیوستگی جریان و جدا شدن قطره از جریان جت مایع می شود. این اتفاق در کانتورهای سرعت در شکل 12 قابل مشاهده می باشد.

## 2-5- پدیده تغییر محور و مشخصه های آن

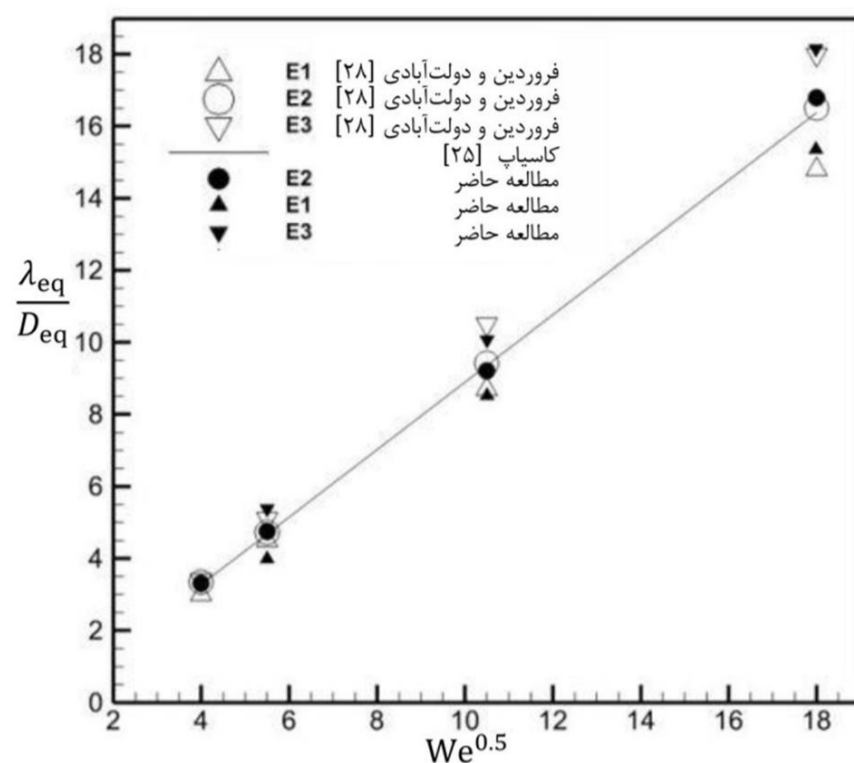
در این قسمت نتایج مربوط به شبیه سازی برای پدیده تغییر محور خواهد آمد. این نتایج شامل تغییرات طول موج تغییر محور به ازای اعداد وبر متفاوت، اعداد تغییر محور متفاوت و برای اریفیس های گوناگون خواهد بود.

شکل 13 تغییرات طول موج تغییر محور بدون بعد را به ازای اریفیس های متفاوت برای وبرهای متفاوت را نشان می دهد. برای بی بعد سازی نیز از نسبت مقدار طول موج تغییر محور (فاصله دو نقطه اوج یا دو نقطه فرود تغییر محور) که در شکل 1 نشان داده شده و قطر معادل جت، استفاده شده است. طبق پیش بینی حاصل از بررسی های تئوری مقدار طول موج تغییر محور برابر با  $\lambda_{as} = \frac{2\pi}{\sqrt{6}} \sqrt{We - 2}$  در نظر گرفته می شود [23]، یعنی به ازای افزایش وبر شاهد رشد طول موج تغییر محور خواهیم بود.

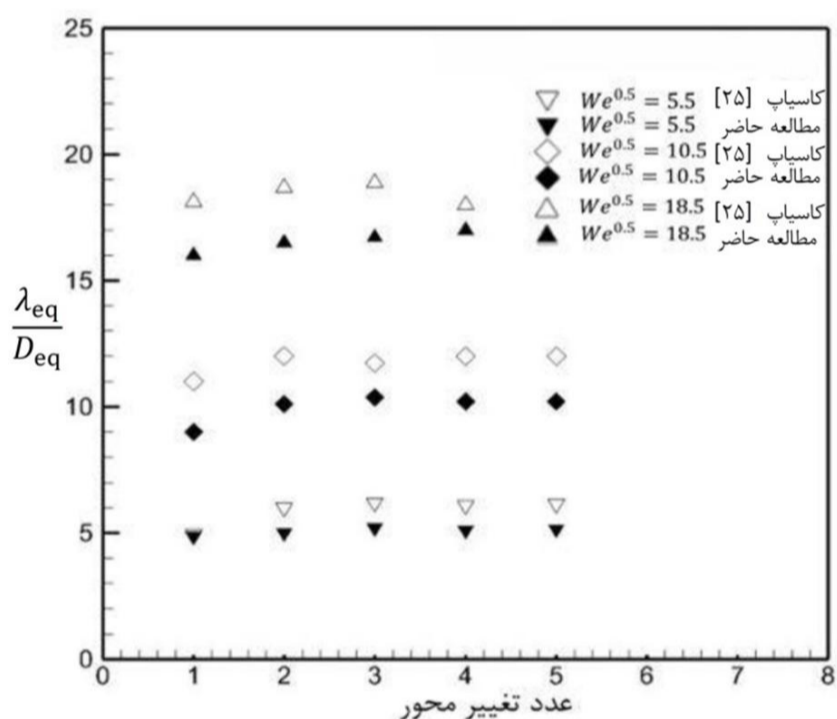
محور هستیم که با نتایج حاصل از تحقیقات تجربی کاسیاب همخوانی دارد. این نتایج توسط فروردین و دولت آبادی [28] برای شبیه سازی با مدل های LES, K-eps و جریان آرام برای اریفیس E2 مقایسه شده است که در شکل 16 ملاحظه می شود.

در مقایسه با نتایج تجربی کاسیاب [25]، مشخص است که مدل سازی به روش LES در این مسئله از تطابق بسیار بهتری برخوردار بوده و فرایند ثابت شدن طول موج تغییر محور را بسیار بهتر به نمایش می گذارد.

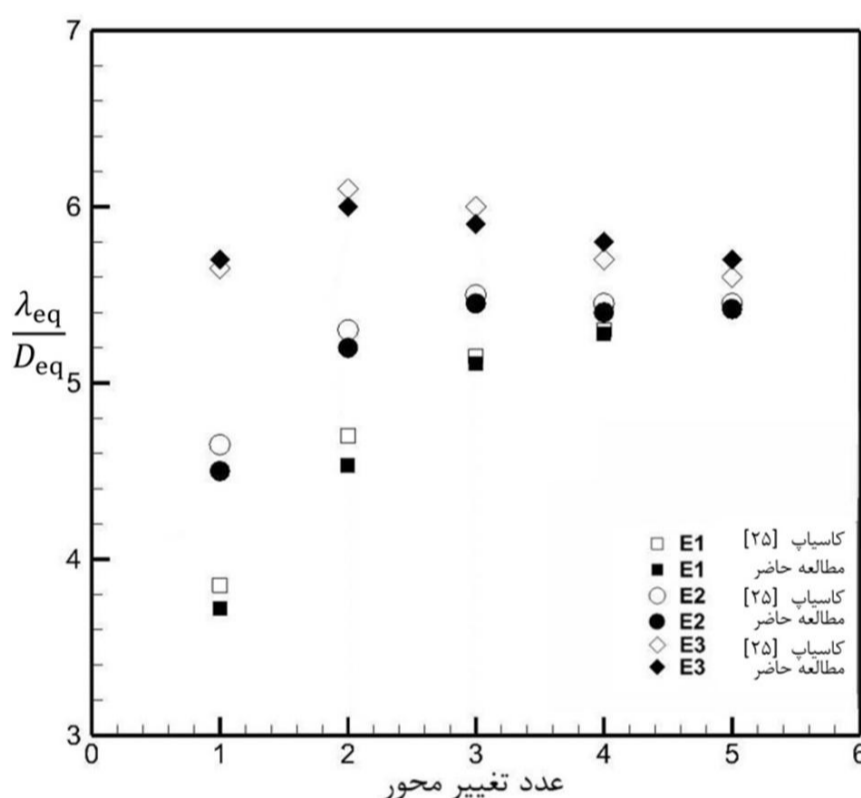
اگر بزرگترین مقدار دامنه محور اصلی بیضی که در اولین نقطه اوج دامنه محور اصلی بیضی بعد از خروج جت از اریفیس محاسبه می شود را  $D_{max}$  بنامیم، تغییرات عدد بدون بعد  $\frac{D_{max}}{D_{eq}}$  بر حسب تغییرات عدد وبر در شکل 17 نشان داده شده است. در یک اریفیس با نسبت منظری ثابت، به ازای افزایش عدد وبر و در واقع اینرسی جت شاهد افزایش مقدار  $\frac{D_{max}}{D_{eq}}$  خواهیم بود. از طرف دیگر اندازه نسبت منظری با  $\frac{D_{max}}{D_{eq}}$  رابطه عکس دارد زیرا در واقع هرچه نسبت منظری کاهش یابد، مقدار دامنه محور اصلی بیضی در لحظه صفر افزایش می یابد که به نوبه خود باعث افزایش مقدار  $\frac{D_{max}}{D_{eq}}$  خواهد شد.



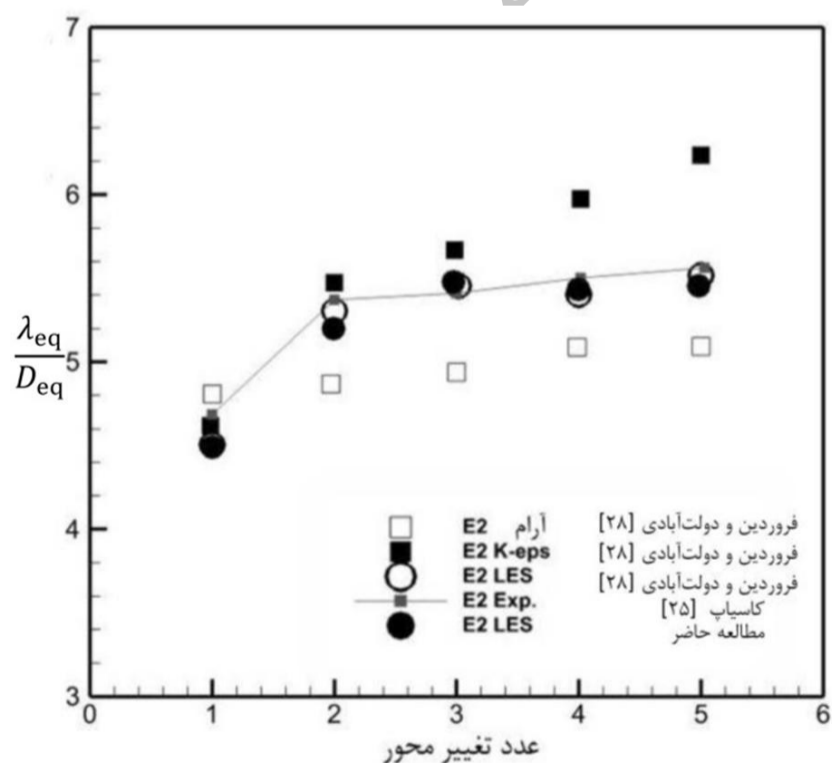
شکل 13 تغییرات طول موج تغییر محور بر حسب عدد وبر برای اریفیس E1, E2, E3



شکل 15 تغییرات طول موج تغییر محور بر حسب عدد تغییر موج برای اریفیس E2



شکل 14 تغییرات طول موج بدون بعد بر حسب عدد تغییر محور برای اریفیس های متفاوت و عدد وبر 30



شکل 16 تغییرات طول موج تغییر محور بر حسب عدد تغییر محور برای اریفیس E2 به ازای شبیه سازی های توربولانسی متفاوت برای وبر 30

طول تغییر محور کاهش یافته اما با دور شدن از دهانه اریفیس این اثر کمتر شده و تبعاً با توجه با اثرات شتاب جاذبه طول موج تغییر محور افزایش می یابد. اما از عدد تغییر محور 2 و 3 و بعد از یک افزایش در طول موج شاهد ثابت شدن این مقدار خواهیم بود. این ثبات نیز ممکن است نشانه ای از به تعادل رسیدن نیروهای لزجی و تنش سطحی با اثرات شتاب جاذبه باشد [25].

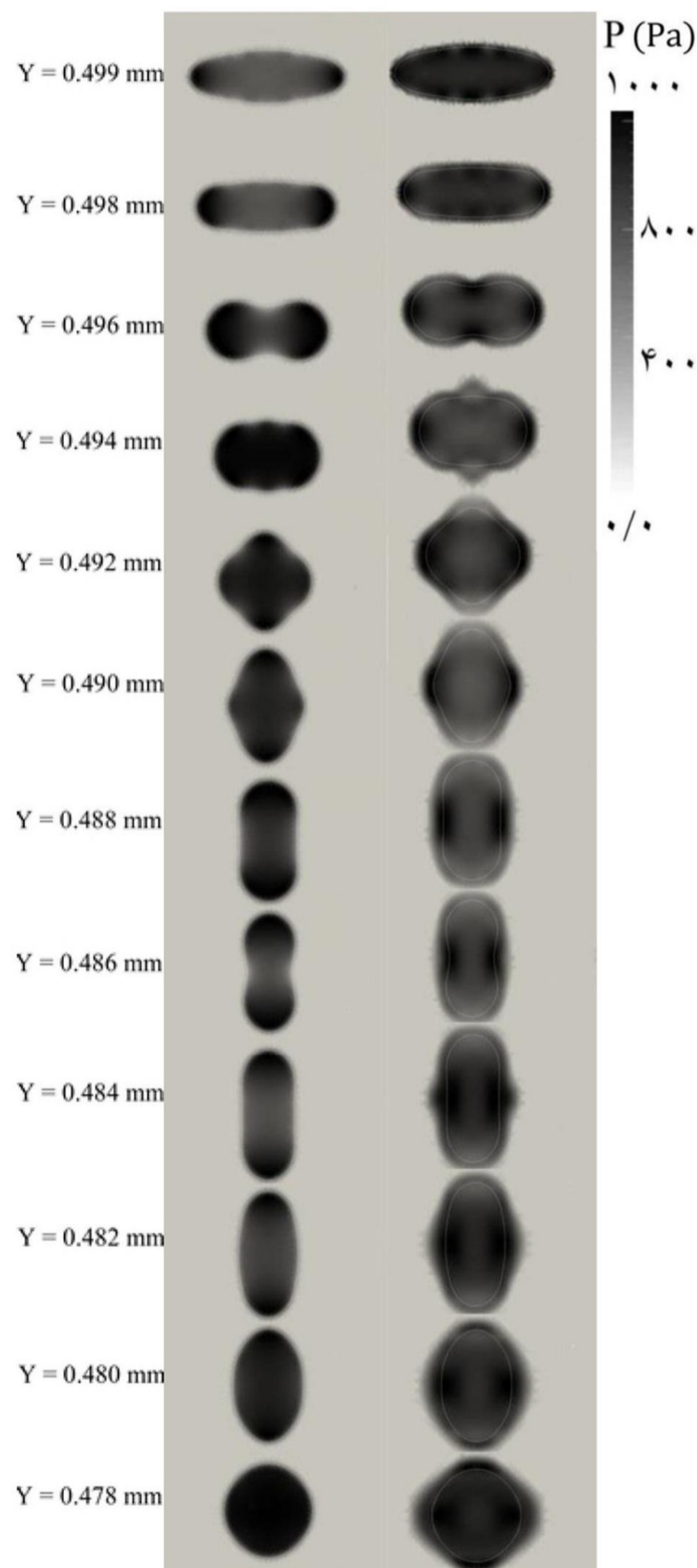
در شرایط یکسان به ازای کاهش نسبت منظری نیز تغییرات بیشتری در سطح مقطع جت برای تغییر کامل محور لازم است اتفاق بیافتد که نتیجه آن می تواند افزایش طول موج تغییر محور باشد.

تغییرات طول موج به ازای اعداد تغییر محور متفاوت برای وبرهای متفاوت و به ازای اریفیس E2 در شکل 15 قابل مشاهده است. با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی، همچنان طول موج تغییر محور به ازای اعداد موج اول افزایش یافته اما بعد از عدد موج دوم ثابت می شود. همچنین با افزایش عدد وبر و کاهش اثرات تنش سطحی شاهد بزرگ تر شدن طول موج تغییر

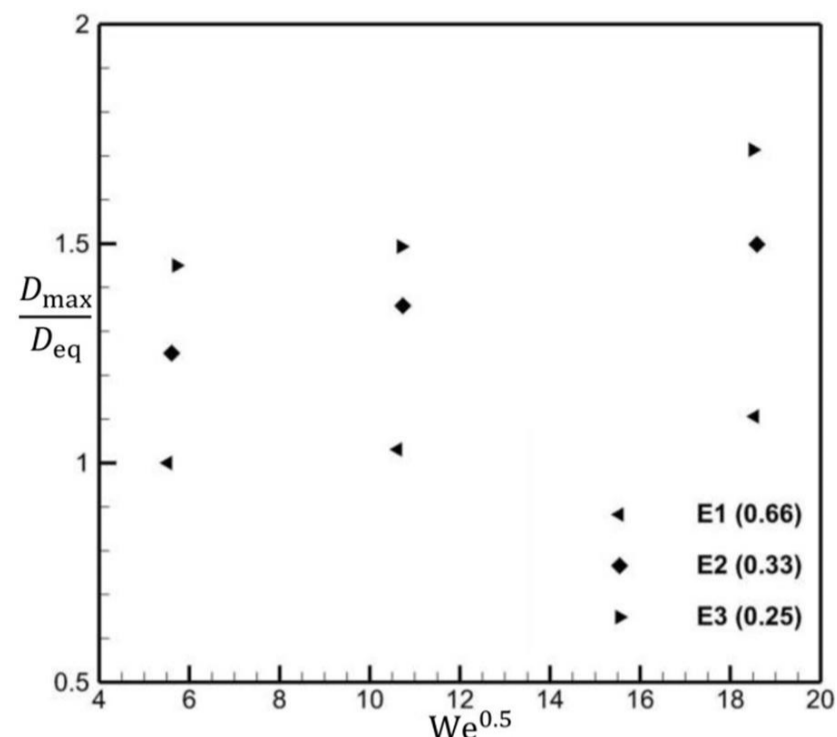


کمتر شده و عملاً این نوسان میرا می شود. در حقیقت اثر لزجت به عنوان یک اثر میرا کننده، بر جریان با نسبت منظری کمتر، بیشتر است چرا که دامنه حرکتی تغییر محور این جت بزرگتر است [25]. ضمناً با توجه به کمتر بودن نسبت منظری در اریفیس E2 شاهد کاهش بیشتر  $\frac{D_{max}}{D_{eq}}$  هستیم اما نهایتاً مقدار نهایی  $\frac{D_{max}}{D_{eq}}$  برای تمامی جت ها به مقدار تقریباً یکسانی می رسد.

قطرات ماهواره ای، قطراتی با اندازه بسیار کوچک نسبت به سایر قطرات موجود در جریان هستند که معمولاً در فاصله بین قطرات اصلی تشکیل می شوند. این مفهوم در شکل 6 به عنوان نتیجه ای برای مقایسه طول شکست



شکل 18 کانتور فشار برحسب پاسکال (سمت چپ) و سرعت برحسب  $\frac{m}{s}$  (سمت راست) در مکان های مختلف برای جت خروجی از اریفیس E2



شکل 17 تغییرات دامنه بزرگترین طول قطر محور اصلی بیضی با جذر عدد وبر برای اریفیس های با نسبت منظری متفاوت

شکل 18 نشان دهنده کانتورهای سرعت و فشار در مکان های مختلف برای مقطع جت مایع خروجی از اریفیس E2 می باشد. طبق تعریف پدیده تغییر محور، جت خروجی از اریفیس بیضوی با توجه به شکل سطح مقطع آن، ناپایدار است و به همین خاطر سعی در رسیدن به سطح مقطعی دایروی دارد. کانتورهای فشار نشان دهنده بیشتر بودن مقدار فشار در نواحی دارای انحنای بیشتر در سطح مقطع هستند و به تبع آن موجب حرکت این نواحی می شوند. این فشار بیشتر بر این نواحی حاکم است تا جایی که جت به سطح مقطعی نسبتاً دایروی می رسد.

در این حالت توزیع فشار در سطح مقطع جت به مقداری تقریباً ثابت در تمام آن می رسد اما با توجه به اینرسی ناشی از تبدیل سطح مقطع بیضی به دایره، سطح مقطع به فرم دایروی باقی نمانده و به تغییر فرم خود ادامه می دهد تا جایی که تبدیل به بیضی عمود بر بیضی اولیه می شود و این فرایند ادامه می یابد. کاهش اثر پدیده تغییر محور با پیشروی جت نیز در اثر میرایی ناشی از لزجت در این شکل مشخص می باشد [25].

### 3-5- قطرات حاصل از شکست

در این قسمت نتایج مربوط به قطرات حاصل از شکست جت مایع بیضوی برای اعداد وبر و با نسبت منظری متفاوت ذکر می شود.

همان گونه که در مورد شکل 2 توضیح داده شد، نرخ رشد اغتشاشات در جت با کاهش نسبت منظری اریفیس به طرز چشم گیری افزایش می یابد که منجر به کاهش طول شکست جت می شود [21] و اثرات آن در شکل های 6 و 10 مشاهده شد.

اثر دیگر این افزایش نرخ رشد، بر روی قطرات حاصل از شکست جت است. براساس نتایج حاصل از مطالعه بر روی جت های دایروی، در صورتی که بتوان نرخ رشد اغتشاشات جت را افزایش داد، قطر قطرات بدست آمده از شکست جت به یکدیگر نزدیک تر می شود، ضمن این که تعداد و قطر قطرات موسوم به قطرات ماهواره ای نیز به شدت کاهش می یابد.

شکل 19 به بررسی تغییرات مقدار حداکثر دامنه محور به ازای عددهای تغییر محور مختلف برای اریفیس های مختلف در عدد وبر 30 است. طبق نتایج بدست آمده، هر چه عدد تغییر محور بالاتر رود شاهد کاهش مقدار دامنه طول محور خواهیم بود تا این که این مقدار حتی از مقدار قطر معادل نیز

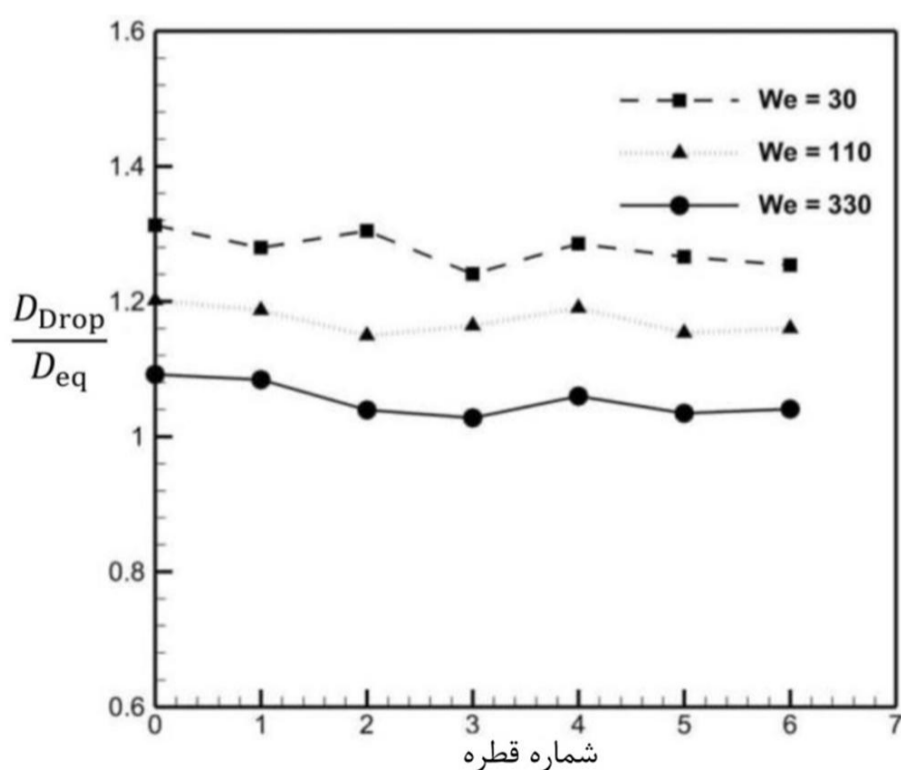
نسبت منظری کمتر نیز دارای قطرات یکدست تری می باشند. موید این جمله، نتایج حاصل از جت E3 است که قطر قطرات حاصل از شکست آن از قطر سایر قطرات کمتر است، ضمن این که اندازه قطرات بدست آمده نیز بسیار به هم نزدیک است.

شکل 21 هم نتایج بدست آمده برای نسبت بدون بعد قطر قطرات حاصل از شکست جت E2 به قطر معادل جت به ازای اعداد وبر متفاوت را نمایش می دهد.

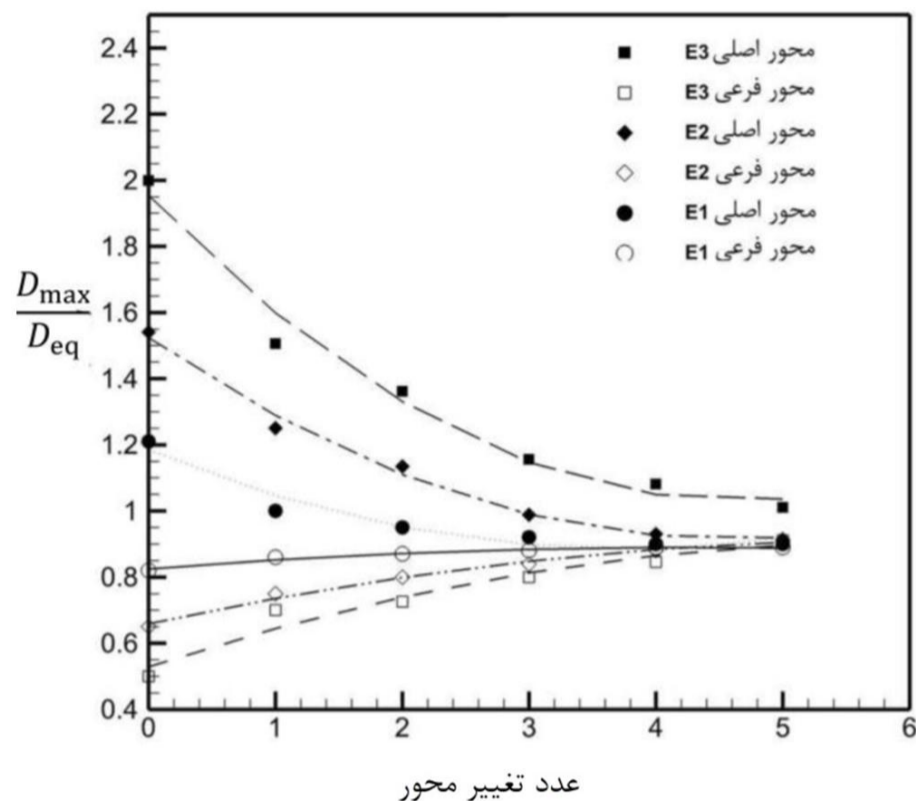
بر طبق این نتایج، با افزایش عدد وبر در بازه رژیم ریلی که با افزایش اینرسی و البته افزایش نرخ رشد اغتشاشات همراه است، قطر قطرات بدست آمده کاهش می یابد. بدین ترتیب اندازه قطرات حاصل از شکست جت با عدد وبر 330 کمترین مقدار نسبت به اندازه قطرات بدست آمده از شکست جت با اعداد وبر کمتر است. ضمناً میزان تغییرات اندازه قطرات در جت های با اعداد وبر بالاتر، کمتر است. یعنی در صورت افزایش وبر جریان و با افزایش نرخ رشد اغتشاشات جریان، زمان مورد نیاز برای جدا شدن یک قطره از انتهای جت کاهش می یابد و بدین نحو قطراتی با اندازه یکسان تر بدست می آید.

برای درک بهتر فرایند شکست جت و نحوه پیدایش قطرات ماهواره ای در جت نیز می توان از شکل 22 بهره برد. در هنگام شکست جت، شاهد تشکیل یک نقطه گلوگاهی درست قبل از شکست جت هستیم. در لحظه شکست، با توجه به تشکیل قطره در انتهای جت، این ناحیه گلوگاهی کشیده شده و تبدیل به یک رشته باریک جریان می شود. در هنگام جدا شدن کامل قطره، اتصال این باریکه جریان با قطره کاملاً قطع می شود اما معمولاً اتصال این باریکه به جریان اصلی جت همچنان برقرار است.

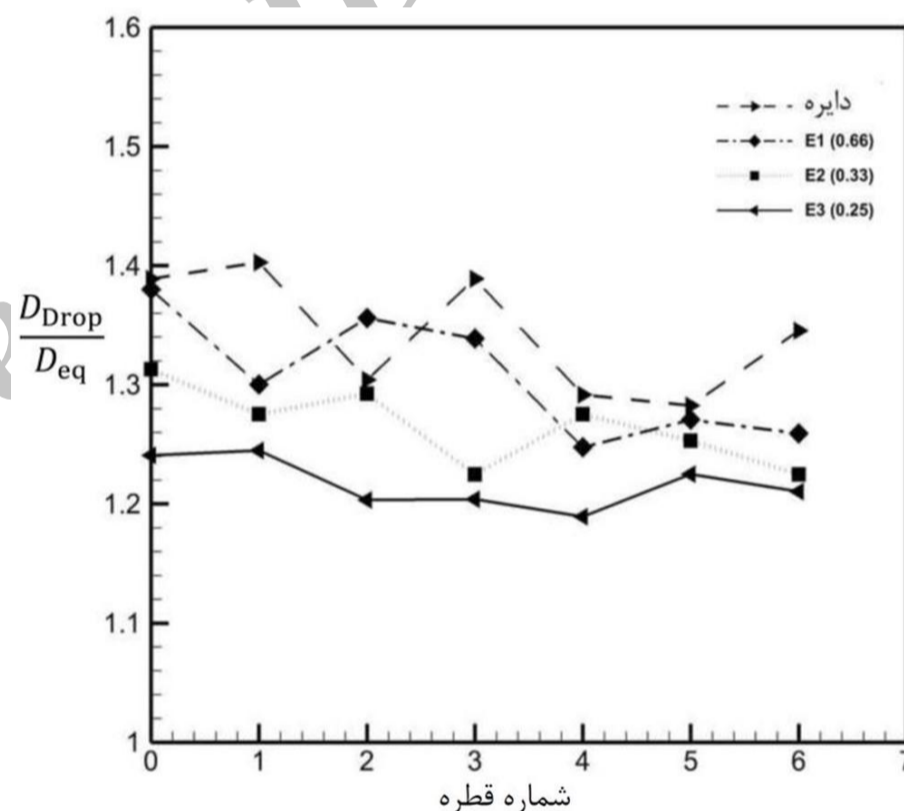
با پیشروی جریان در صورتی که اینرسی سیال به مقدار کافی باشد، این ناحیه لایه ای به بدنه جت اصلی بر می گردد اما در صورت کم بودن اغتشاشات و به تبع آن کمتر بودن اینرسی، ارتباط این باریکه جریان قبل از اینکه بتواند به بدنه جت اصلی متصل شود قطع می شود. بدین ترتیب یک رشته نازک جریان بین قطره اصلی جدا شده و جریان جت به وجود خواهد آمد که کم کم تبدیل به قطره ای با ابعاد بسیار کوچک تر می شود که به قطره ماهواره ای موسوم است. این قطرات معمولاً به شکلی هستند که با فاصله خاصی بین قطرات حاصل از شکست باقی می ماند و به نوعی ترکیب یکدست جریان را برهم می زنند. البته گاهی با توجه به اینرسی موجود در قطرات و جت اصلی،



شکل 21 اندازه بدون بعد قطر قطرات حاصل از شکست جت E2 برای اعداد وبر متفاوت



شکل 19 تغییرات مقدار دامنه قطر بیضی به ازای عدد تغییر محور مختلف به همراه منحنی های بهترین فیت برای هر کدام برای عدد وبر 30



شکل 20 اندازه بدون بعد قطر قطرات حاصل از شکست جت برای اریفیس های متفاوت در وبر 30

جت ها با نسبت های منظری متفاوت، قابل مشاهده است. طبق این شکل، قطرات ماهواره ای بیشتری در جت دایروی وجود دارد و هرچه نسبت منظری جت کاهش می یابد، حضور این قطرات ماهواره ای کمتر می شود.

شکل 20 نمایشگر نسبت بدون بعد قطر قطرات حاصل از شکست برای جت های با اریفیس متفاوت به قطر معادل جت است که با  $\frac{D_{Drop}}{D_{eq}}$  نمایش داده می شود. براساس نتایج بدست آمده، شکست جت دایروی منجر به قطرات با قطر بزرگتری نسبت به شکست جت های بیضوی می شود.

این روند در مورد جت های بیضوی نیز تا اندازه ای ادامه می یابد به نحوی که قطر قطرات حاصل از شکست جت با کاهش نسبت منظری، به میزان اندکی کاهش می یابد. نکته مهم دیگر این است که اندازه قطرات حاصل از جت های بیضوی به علت بزرگ تر بودن نرخ رشد اغتشاشات آنها، دارای تغییرات کمتری نسبت به جت دایروی است. ضمن اینکه جت های بیضوی با

ماهواره‌ای کاهش می‌یابد ضمن این که این افزایش نرخ رشد اغتشاشات احتمال جذب قطرات ماهواره‌ای را در طول حرکت توسط سایر قطرات اصلی افزایش می‌دهد و بدین ترتیب با حذف قطرات ماهواره‌ای، قطرات یکسان‌تری در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

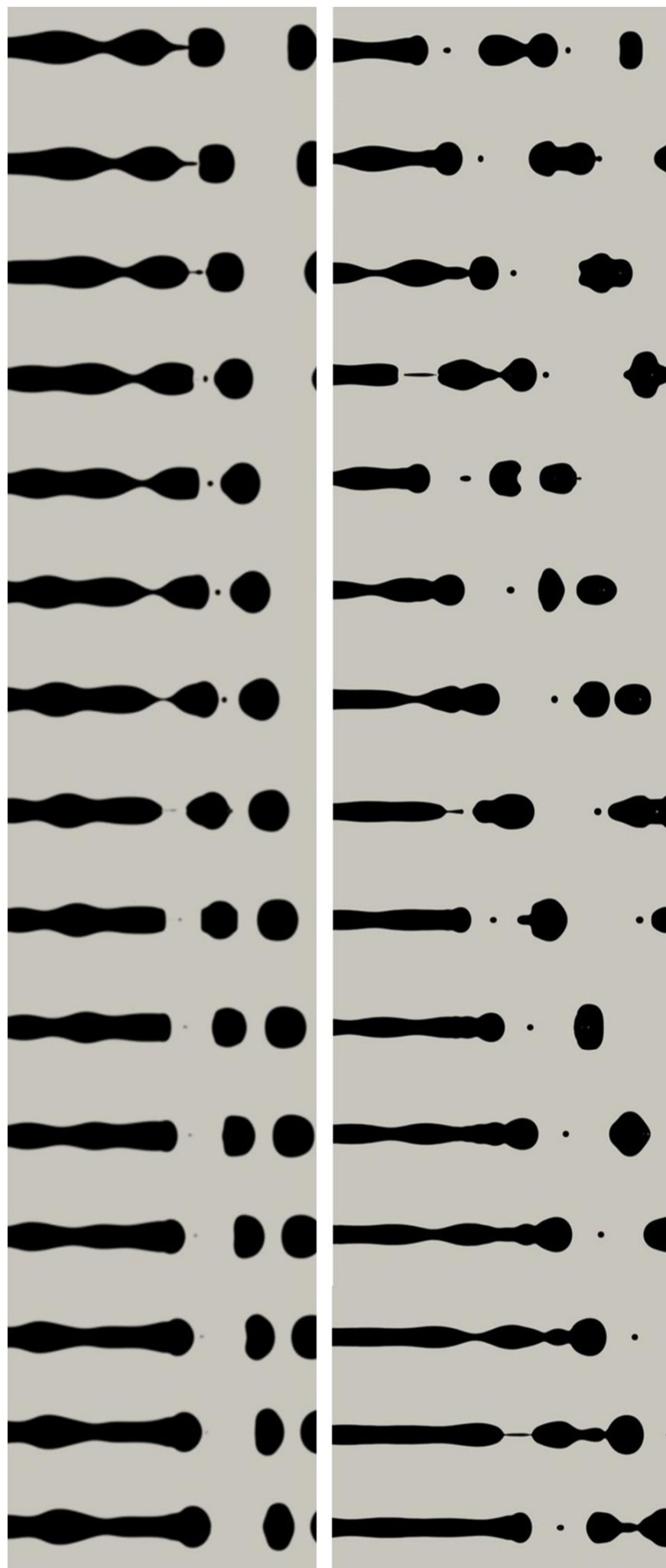
با دقت در شکل 22 می‌توان به خوبی پدیده تشکیل قطرات ماهواره‌ای توضیح داده شده را تشخیص داد. برای تشخیص هرچه بهتر این پدیده، از نتایج جت دایروی در مقایسه با جت E3 که بیشترین اختلاف را در نرخ رشد اغتشاشات با یکدیگر دارند، استفاده شده است. طبق این شکل لایه جریان تشکیل شده بین قطره و جت اصلی برای جت دایروی بسیار بزرگتر از لایه جریان تشکیل شده در جت E3 است و به تبع آن کاهش اندازه قطرات ماهواره‌ای و یا حتی عدم تشکیل آن‌ها اتفاق می‌افتد. ضمناً در جت دایروی، قطرات ماهواره‌ای فاصله خود را با قطرات کناری خود حفظ می‌کنند در حالی که در جت E3 قطرات ماهواره‌ای کوچک‌تر به وجود آمده و با نزدیک شدن به یکی از قطرات کناری، جذب آن‌ها می‌شوند و شاهد حضور این قطرات در جریان نخواهیم بود.

### 6- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی جت مایع با کمک اریفیس‌های بیضوی، بدست آمد و با نتایج حاصل از آزمایشات تجربی کاسیپ و مطالعات عددی فروردین و دولت آبادی نیز مقایسه شد. نتایج نشان دهنده کاهش طول شکست جت به ازای کاهش نسبت منظری اریفیس بود بدین معنی که در محدوده نسبت منظری مورد مطالعه در این مقاله، هرچه دهانه اریفیس بیضوی‌تر شود، طول شکست کاهش می‌یابد. ضمن این که اثرات افزایش عدد وبر بر طول شکست نیز در تمامی اریفیس‌های مورد بحث مورد ارزیابی قرار گرفت و طبق نتایج بدست آمده هرچه مقدار عدد وبر جریان در حوزه رژیم ریلی افزایش پیدا کند، شاهد افزایش مقدار طول شکست جت خواهیم بود. علاوه بر این وقوع پدیده تغییر محور نیز که مختص جریان‌های بیضوی است در این تحقیق مورد کنکاش قرار گرفت. بدین ترتیب که ابتدا مقدار طول موج بدون بعد تغییر محور به ازای اریفیس‌ها و در اعداد وبر مختلف بررسی گردید و طبق نتایج هرچه نسبت منظری اریفیس کاهش یابد مقدار طول موج تغییر محور افزایش خواهد یافت. علاوه بر این با افزایش عدد وبر جریان نیز عدد طول موج تغییر محور افزایش می‌یابد. نکته قابل ذکر این است که با توجه به تعریف طول موج تغییر محور به عنوان فاصله بین دو عدد تغییر محور زوج یا فرد اعداد (شکل 1)، مقدار طول موج تغییر محور دارای مقادیر متفاوت خواهد بود و در ابتدا با رشد عدد تغییر محور (اندازه‌گیری فاصله بین اعداد تغییر محور ابتدایی مثلاً 0 تا 2 و سپس 1 تا 3 و به همین ترتیب)، دامنه طول موج تغییر محور نیز رشد می‌نماید اما در نهایت به مقداری ثابت می‌رسد.

قدم بعدی مقایسه مدل توربولانسی مناسب برای استفاده در جریان‌های بیضوی بود که با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های آقایان فروردین و دولت‌آبادی روش شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ برای انجام شبیه‌سازی انتخاب و داده‌های نسبتاً مناسبی بدست می‌دهد. نهایتاً مقدار حداکثر دامنه محور اصلی اریفیس مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، هرچه عدد وبر افزایش یابد با توجه به افزایش اینرسی جت، شاهد افزایش دامنه حداکثر طول محور اصلی خواهیم بود. مقدار حداکثر طول محور اصلی به ازای اریفیس با کمترین نسبت منظری، بیشترین مقدار خود را بدست خواهد آورد.

سپس اندازه طول محور اصلی و محور فرعی بیضی به ازای عدد تغییر



الف. جت E3

ب. جت دایروی

شکل 22 قطرات حاصله از شکست جت در جریان با عدد وبر 30 الف. جت E3 ب. جت دایروی

قطرات ماهواره‌ای به وجود آمده، در میان قطرات اصلی باقی نمی‌مانند و فاصله آن‌ها با قطرات سمت چپ یا راست خود کمتر می‌شود که نهایتاً باعث ترکیب دوباره قطرات ماهواره‌ای با قطرات اصلی می‌شود.

طبق نتایج بدست آمده از تحقیقات بر روی جت‌های دایروی، هرچه میزان نرخ رشد اغتشاشات بیشتر باشد، احتمال به وجود آمدن رشته باریک جریان بین قطرات اصلی کمتر می‌شود و به تبع آن شانس حضور قطرات

- [9] R. Reitz, F. Bracco, Mechanisms of breakup of round liquid jets, *Encyclopedia of fluid mechanics*, Vol. 3, pp. 233-249, 1986.
- [10] C. Dumouchel, On the experimental investigation on primary atomization of liquid streams, *Experiments in fluids*, Vol. 45, No. 3, pp. 371-422, 2008.
- [11] M. R. A. S.Khosravi, The Effect Of Various Parameters On Breakup Length Of The outflow From The Nozzle, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 125-133, 2012 (In Persian).
- [12] M.Farahnak, A. S. , Investigation of Break up Length of Discharging Liquid Jet relying Circular Orifice Size *20th Annual International Conference on Mechanical Engineering*, 2012.
- [13] H. S. Husain, F. Hussain, Elliptic jets. Part 3. Dynamics of preferred mode coherent structure, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 248, pp. 315-361, 1993.
- [14] A. Konkachbaev, N. Morley, K. Gulec, T. Sketchley, Stability and contraction of a rectangular liquid metal jet in a vacuum environment, *Fusion engineering and design*, Vol. 51, pp. 1109-1114, 2000.
- [15] E.-S. R. Negeed, S. Hidaka, M. Kohno, Y. Takata, Experimental and analytical investigation of liquid sheet breakup characteristics, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 32, No. 1, pp. 95-106, 2011.
- [16] Y. F. Dityakin, On the Stability and Breakup Into Drops of a Liquid Jet of Elliptical Cross Section, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Otdel. Tekhn Nauk*, Vol. 10, No. PP, pp. 124-130, 1954.
- [17] S. Bechtel, M. Forest, D. Holm, K. Lin, One-dimensional closure models for three-dimensional incompressible viscoelastic free jets: von Kármán flow geometry and elliptical cross-section, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 196, pp. 241-262, 1988.
- [18] S. Bechtel, The oscillation of slender elliptical inviscid and Newtonian jets: Effects of surface tension, inertia, viscosity, and gravity, *Journal of applied mechanics*, Vol. 56, No. 4, pp. 968-974, 1989.
- [19] D. Caulk, P. M. Naghdi, On the onset of breakup in inviscid and viscous jets, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 46, No. 2, pp. 291-297, 1979.
- [20] D. Caulk, P. Naghdi, The influence of twist on the motion of straight elliptical jets, *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, Vol. 69, No. 1, pp. 1-30, 1979.
- [21] G. Amini, A. Dolatabadi, Capillary instability of elliptic liquid jets, *Physics of Fluids (1994-present)*, Vol. 23, No. 8, pp. 084109, 2011.
- [22] G. Amini, A. Dolatabadi, Axis-switching and breakup of low-speed elliptic liquid jets, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 42, pp. 96-103, 2012.
- [23] G. Amini-Baziani, *Instability of Elliptic Liquid Jets*, Thesis, Concordia University, 2011.
- [24] F. Wang, T. Fang, Liquid jet breakup for non-circular orifices under low pressures, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 72, pp. 248-262, 2015.
- [25] T. Kasyap, D. Sivakumar, B. Raghunandan, Flow and breakup characteristics of elliptical liquid jets, *International journal of multiphase flow*, Vol. 35, No. 1, pp. 8-19, 2009.
- [26] E. Brown, J. Boris, A Numerical Simulation of Circular and Elliptic Free Jets, in *Proceeding of*.
- [27] R. Miller, C. Madnia, P. Givi, Numerical simulation of non-circular jets, *Computers & fluids*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-25, 1995.
- [28] E. Farvardin, A. Dolatabadi, Numerical Simulation of the Breakup of Elliptical Liquid Jet in Still Air, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 135, No. 7, pp. 071302, 2013.
- [29] A. H. Lefebvre, *Gas turbine combustion*: CRC Press, 2010.

محور مختلف بررسی گردید. برطبق آن، به ازای تمامی اریفیس ها هرچه عدد تغییر محور افزایش یابد دامنه طول محور اصلی کاهش و اندازه طول محور فرعی افزایش می یابد تا جایی که حتی از مقدار قطر معادل نیز کمتر شده و نهایتاً پدیده تغییر محور در جریان میرا می گردد. این روند در مورد جریان های با وبر بالاتر نیز صادق است با این تفاوت که در جریان های با وبر بالاتر این میزان تغییرات اندازه طول محورهای اصلی و فرعی کمتر است.

نهایتاً اندازه قطرات حاصل از شکست جت برای اریفیس های متفاوت و در وبرهای متفاوت مورد تحلیل قرار گرفت. بر این اساس هرچه نسبت منظری جت بیضوی کاهش یابد، همزمان با افزایش نرخ رشد اغتشاشات اندازه قطرات بدست آمده از شکست جت کاهش می یابد و به مقداری یکدست تر نزدیک می شود، ضمن اینکه احتمال حضور قطرات ماهواره ای در این جریان ها به شدت کمتر می شود به نحوی که در جریان جت E3 شاهد قطرات ماهواره ای نبودیم. البته لازم به ذکر است که در شبیه سازی عددی و با توجه به احتمال وجود خطای بیشتر برای شبیه سازی قطرات ماهواره ای با ابعاد بسیار کوچک، این احتمال وجود دارد که قطرات ماهواره ای در جریان تجربی جت E3 وجود داشته باشند اما در شبیه سازی عددی دیده نشوند. نکته مهم این است که در این مورد می توان با قطعیت بالاتری به این نتیجه رسید که اندازه این قطرات نسبت به قطرات ماهواره ای جت های دیگر، کوچک تر خواهد بود.

## 7- مراجع

- [1] A. Lefebvre, *Atomization and sprays*: CRC press, 1988.
- [2] W. Ohnesorge, Formation of Drops by Nozzles and the Breakup of Liquid Jets, *Z. Angew. Math. Mech.*, Vol. 16, pp. 355-358, 1936.
- [3] F. Savart, Mémoire sur la constitution des veines liquides lancées par des orifices circulaires en mince paroi, *Ann. Chim. Phys*, Vol. 53, pp. 337, 1833.
- [4] J. Plateau, Statique experimentale et theorique des liquids soumis aux seules forces moleculaires. Cited by Lord Rayleigh, *Theory of Sound*, Vol. II, 1945.
- [5] L. Rayleigh, On the Capillary Phenomena of Jets, *Proc. R. Soc. London*, Vol. 29, pp. 71-97, 1879.
- [6] C. Weber, Zum zerfall eines flüssigkeitsstrahles, *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, Vol. 11, No. 2, pp. 136-154, 1931.
- [7] M. Ahmed, M. Abou-Al-Sood, A one-dimensional model of viscous liquid jets breakup, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 133, No. 11, pp. 114501, 2011.
- [8] M. Ahmed, M. Youssef, M. Abou-Al-Sood, Two-dimensional modeling of viscous liquid jet breakup, *Acta Mechanica*, Vol. 224, No. 3, pp. 499-512, 2013.