



## بررسی اثر آشفته‌ساز بر عملکرد اجکتور بخار

شعبان علیاری شوره‌دلی<sup>۱\*</sup>، علی گلپور<sup>۲</sup>

۱ - استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران  
۲- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران  
\* sh\_alaryi@sru.ac.ir, 16785-163 صندوق پستی

### چکیده

اجکتورها در زمینه‌ی انرژی استفاده‌ی فراوانی داشته و به عنوان عنصر کلیدی در سیکل تبرید اجکتوری به کار می‌روند. اجکتور مافوق صوت با مشخصه‌های عملکردی مطلوب، باعث کاهش نرخ مصرف انرژی سیستم تبرید و بهبود عملکرد آن می‌شود. یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد اجکتور هندسه نازل اولیه است. در این مقاله اثر قرار دادن آشفته‌ساز در بخش واگرایی نازل اولیه بر عملکرد و فیزیک جریان اجکتور به صورت نظری بررسی شده است. برای این منظور از تحلیل جریان در نرم افزار ANSYS FLYENT 17.2 استفاده شده است. با استفاده از سه آشفته‌ساز با مقطع مستطیلی و به ارتفاع‌های 0.1 mm، 0.25 mm و 0.5 mm که در خروجی نازل و در فاصله 1 mm و 4 mm از خروجی نازل قرار گرفته‌اند، اثر ارتفاع و موقعیت آشفته‌ساز بر عملکرد و جریان داخلی اجکتور بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که فیزیک جریان داخلی اجکتور تابع موقعیت و ارتفاع آشفته‌ساز است. در ابتدای ناحیه اختلاط ضخامت لایه اختلاط تابع ارتفاع آشفته‌ساز نیست. نسبت مکش متناسب با حجم لایه اختلاط است. برای اجکتور مورد مطالعه برای آشفته‌ساز واقع در فاصله 1 mm از خروجی نازل و با ارتفاع 0.25 mm نسبت مکش نسبت به حالت بدون آشفته‌ساز 4% افزایش می‌یابد.

### کلیدواژگان

اجکتور، لایه اختلاط، آشفته‌ساز

## Investigation of the Effect of Turbulator on Performance of Steam Ejector

Shaban Alyari Shourehdeli<sup>1\*</sup>, Ali Golpour<sup>2</sup>

1- Department of mechanical engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.  
2- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran  
\* P.O.B. 16785-163 Tehran, Iran, sh\_alaryi@sru.ac.ir

### Abstract

Ejectors are widely used in energy fields and they are the key components in ejector refrigeration cycles. Supersonic ejectors with optimal performance reduce energy consumption in refrigeration systems and improve their performance. Geometry of the primary nozzle is one of the parameters that affect the ejector performance. In this paper, the effect of using turbulator on the diverging portion of the primary nozzle on the ejector performance and its internal flow was investigated theoretically. For this purpose, CFD methods in ANSYS FLYENT 17.2 software were used. Three turbulator with rectangular cross section and different heights (0.1, 0.25, 0.5 mm) located at different distance from the nozzle exit (0, 1, 4 mm) were used to investigate the effect of height and position of the turbulator on the ejector performance and its internal flow. The results show that the internal flow physics of the ejector is a function of position and height of the turbulator. At the beginning of the mixing zone, the thickness of the mixing layer is independent of the turbulent height. The entrainment ratio is proportional to the volume of the mixing layer. Turbulator with 0.25 mm height located at 1 mm distance from nozzle exit increases ejector entrainment ratio by 4% relative to the ejector without turbulator.

### Keywords

Ejector, Mixing layer, Turbulator

### ۱- مقدمه

اجکتورهای مافوق سرعت به دلیل عملکرد و ساختمان ساده در موارد بسیاری مانند چرخه‌های تبرید، پیل‌های سوختی و ایجاد خلاء به کار می‌روند. امروزه پژوهش‌های فراوانی در زمینه بررسی اثر پارامترهای هندسی بر عملکرد و فیزیک جریان داخلی اجکتور در حال انجام است [1]. هندسه نازل اولیه از پارامترهای هندسی است که کمتر مورد توجه قرار گرفته است. چنانچه وچن [2] به صورت تجربی اثر کاربرد نازل گلبرگی<sup>۱</sup> بر عملکرد اجکتور را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با نسبت سطح اجکتور بزرگ، نازل گلبرگی نسبت تراکم، نسبت دبی جرمی و فشار بحرانی اجکتور را افزایش می‌دهد. علاوه بر این برای اجکتور با نازل گلبرگی مقدار نسبت سطح اجکتور

بهینه‌ای وجود دارد که با آن می‌توان به حداکثر نسبت تراکم دست یافت. آپگنورس و همکاران [3] با اضافه کردن لبه‌هایی<sup>۲</sup> به نازل دایره‌ای با افزایش اختلاط از طریق ناپایداری جریان عملکرد اجکتور را بهبود بخشیدند. نتایج نشان داد که با سطح مقطع خروجی نازل ثابت مقدار بهینه‌ای برای محیط لبه‌ها وجود دارد که با آن بازیافت فشار حداکثر است. یانگ و همکاران [4] به کمک روش‌های دینامیک سیالات عددی اثر استفاده از نازل‌های مخروطی بیضی، مستطیلی و صلیبی<sup>۳</sup> را بر عملکرد اجکتور بخار بررسی نمودند. آنها در یافتند که استفاده از این نازل‌ها فشار بحرانی را کاهش می‌دهد. همچنین نازل‌های صلیبی و مربعی نسبت دبی جرمی را افزایش داده و نازل‌های مستطیلی و بیضی نسبت دبی‌های جرمی را کاهش می‌دهند. کونگ و همکاران

<sup>۲</sup>Lobes

<sup>۳</sup>Cross-shaped

<sup>۱</sup>Petal nozzle

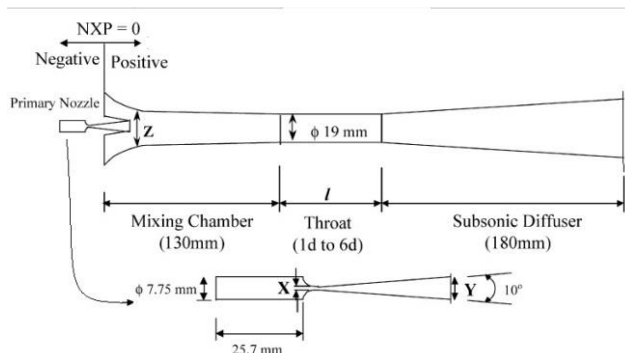


Fig. 1 Ejector geometry used in numerical simulation[9]

شکل ۱ هندسه اجکتور مورد استفاده در شبیه سازی عددی [9]

چرخش، لایه های مرزی با گرادیان های معکوس شدید و جدایش عملکرد بهتری نسبت به دو مدل استاندارد کی اپسیلون و آر ان جی کی اپسیلون دارد، از مدل ریلایزبل کی اپسیلون به عنوان مدل آشفتگی در تحلیل جریان اجکتور استفاده شده است. جهت گسسته سازی معادلات حاکم غیر خطی طرح بالادست مرتبه دوم استفاده شده است.

## ۲-۳- سیال عامل و شرایط مرزی

سیال عامل چرخه تبرید اجکتوری در مطالعه سریوپراکول و همکاران [8] و در نتیجه در کار حاضر بخار آب است. به علت پایین بودن نسبی فشار مطلق در اکثر نواحی اجکتور، رفتار گاز واقعی به گاز ایده آل بسیار نزدیک بوده و در نتیجه فرض گاز ایده آل برای سیال عامل به کار رفته است. برای سیال اولیه، سیال ثانویه و سیال اختلاطی خروجی از اجکتور، گونه های جریانی تعریف شده است. مشخصات ترمودینامیکی گونه های جریانی با فرض بخار اشباع استخراج گردیده است. در کار حاضر دمای سیال اولیه برابر  $130^{\circ}\text{C}$ ، دمای سیال ثانویه  $10^{\circ}\text{C}$  و فشار کندانسور 30 mbar است. شرایط مرزی بالادست جریان- که شامل ورودی سیال اولیه و سیال ثانویه است- ورودی فشار معلوم و شرط مرزی پایین دست جریان- که خروجی جریان اختلاطی از دیفیوزر است- خروجی فشار معلوم در نظر گرفته شده است. تمامی سطوح دیواره ها عایق و صاف در نظر گرفته شده اند. همچنین برای محور اجکتور شرط مرزی محور در نظر گرفته شده است.

## ۲-۴- تولید هندسه و استقلال از شبکه

جهت کاهش هزینه محاسباتی، جریان داخل اجکتور به صورت متقارن محوری در نظر گرفته شده است. به دلیل کیفیت بالاتر، هم جهت بودن سلول ها با جریان داخلی، کنترل پذیری بهتر و اشغال حافظه کمتر شبکه باسازمان نسبت به شبکه بی سازمان، در کار حاضر از شبکه باسازمان با سلول های مربعی استفاده شده است. در شکل 2 شبکه تولید شده و آشفته ساز واقع در خروجی نازل نشان داده شده است.

معمولاً با ریز کردن شبکه ی محاسباتی، دقت محاسبات بهبود می یابد. توجه به این نکته ضروری است که ریز کردن شبکه تا حدی مجاز بوده و بعد از آن به جای بهبود دقت محاسبات خطای محاسباتی را افزایش می دهد. به همین علت جهت بررسی استقلال نتایج از شبکه، نسبت دبی های جرمی

[5] استفاده از نازل چورون<sup>۱</sup> در اجکتور را به صورت عددی بررسی کردند. نتایج نشان داد که نسبت دبی های جرمی تا 14% قابل افزایش است. رائو و جاگا دیش [6] برای بررسی اختلاط در اجکتور دو نازل مافوق صوت نوک حلقه ای<sup>۲</sup> و نازل بیضوی لبه دار کم عمق نوک تیز<sup>۳</sup> را به صورت تجربی بررسی نمودند. هر دو نازل نسبت به نازل مخروطی دبی جرمی جریان ثانویه را 30% افزایش دادند. در حالی که افت نسبت تراکم نسبت به نازل مخروطی در نازل لبه دار 15% و در نازل حلقه ای 50% بود. حکاکی فرد و همکاران [7] برای بهبود عملکرد اجکتور بر پایه دینامیک سیالات عددی روش جدیدی ارائه نمودند. اساس این روش کمینه کردن افت های انرژی برگشت ناپذیر ناشی از تشکیل امواج ضربه قوی است. با اعمال این روش بر روی دو اجکتور، نسبت مکش تا بیشتر از 29% افزایش و فشارهای بحرانی در آن ها در حدود 2.6% کاهش یافت. همچنین نتایج نشان داد که نازل اولیه و موقعیت آن در اجکتور دو عاملی هستند که بیشترین تأثیر را بر روی عملکرد اجکتور دارند. در این مقاله ایده ی استفاده از آشفته ساز در بخش واگرای نازل اولیه ارائه و بررسی شده است.

## ۲- شبیه سازی با دینامیک سیالات محاسباتی

روش دینامیک سیالات محاسباتی شامل دو بخش اساسی ایجاد میدان حل و حل دستگاه معادلات ریاضی است. به منظور انجام هر دو بخش از نرم افزار انسیس فلونت 17/2 استفاده شده است. معادلات غیر خطی حاکم به معادلات جبری تبدیل شده و بر روی سلول های تشکیل یافته حل شده است.

## ۲-۱- مشخصات هندسی اجکتور با نازل مخروطی استفاده شده در شبیه سازی

اجکتور مورد استفاده در کار حاضر اجکتوری است که توسط سریوپراکول و همکاران [8] برای بررسی اثرات هندسی و شرایط عملیاتی بر عملکرد اجکتور به کار رفته است. هندسه اجکتور مورد نظر در شکل 1 نشان داده شده است. همچنین در شکل 1 مقادیر  $X, Y, Z$  و طول گلوگاه به ترتیب برابر 2 mm، 24 mm و 8 mm است. قابل ذکر است که در مطالعه سریوپراکول و همکاران و کار حاضر فاصله خروجی نازل اولیه تا ورودی محفظه مکش مقداری ثابت و برابر  $NXP=35\text{ mm}$  (شکل 4) در نظر گرفته شده است.

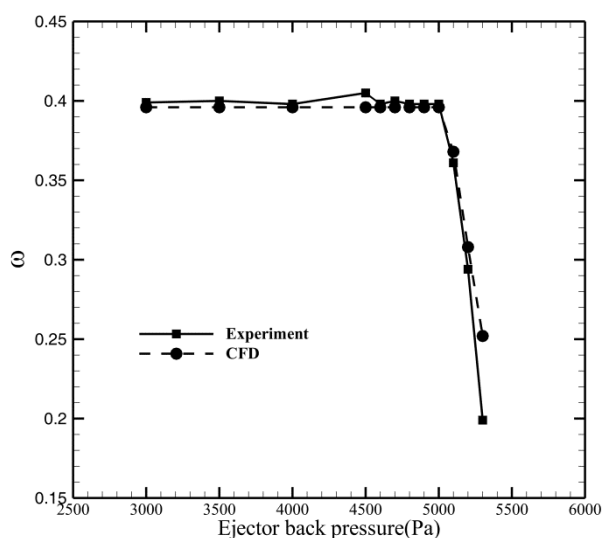
## ۲-۲- روش حل عددی و تنظیمات حلگر

به دلیل مافوق صوت بودن جریان داخلی اجکتور جریان مورد نظر آشفته و تراکم پذیر در نظر گرفته شده است. به دلیل مافوق صوت بودن جریان و اعداد ماخ بالا از حلگر چگالی پایه ضمنی استفاده شده و فرض جریان پایا به کار رفته است [8]. از آنجایی که مدل ریلایزبل کی اپسیلون در جریان های دارای

<sup>۱</sup>Chevron nozzle

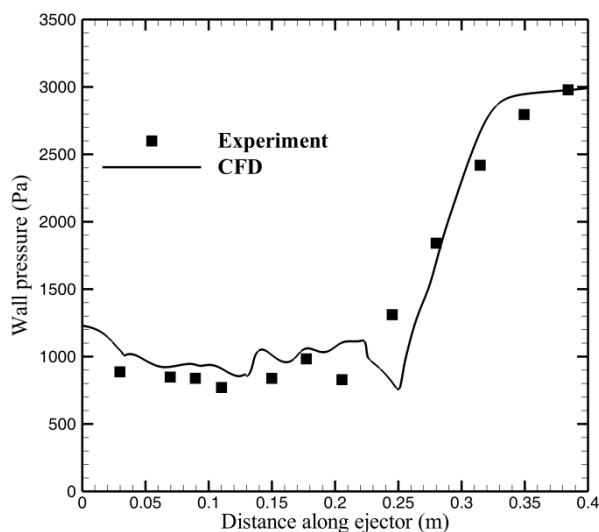
<sup>۲</sup>Tip ring nozzle

<sup>۳</sup>Elliptic sharp tipped shallow lobed nozzle



**Fig. 4** Comparison of numerical results of entrainment ratio with experimental data

شکل ۴ نمودار مقایسه‌ی نتایج عددی نسبت دبی‌های جرمی با داده‌های آزمایشگاهی



**Fig. 5** Comparison of numerical results of ejector wall pressure with experimental data

شکل ۵ نمودار مقایسه‌ی نتایج عددی فشار روی دیوار اجکتور با داده‌های آزمایشگاهی

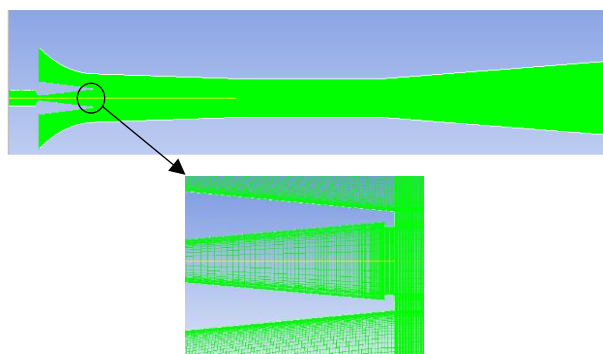
نتایج محاسباتی فشار روی دیوار اجکتور و داده‌های تجربی هم خوانی خوبی وجود دارد.

۳- اثر قرارگیری آشفته ساز در بخش واگرای نازل بر عملکرد اجکتور در کار حاضر اثر قرارگیری یک آشفته ساز در بخش واگرای نازل اولیه بر عملکرد اجکتور بررسی شده است. مقطع آشفته ساز مستطیلی به طول ۱ و

اجکتور برای شبکه‌های مختلف مقایسه شده است. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، با ریز کردن شبکه اختلاف بین مقادیر نسبت دبی‌های جرمی ( $\omega$ ) کاهش می‌یابد. در نتیجه شبکه با ۶۰۸۳۸ سلول به عنوان شبکه پایه جهت تحلیل عددی انتخاب شده است.

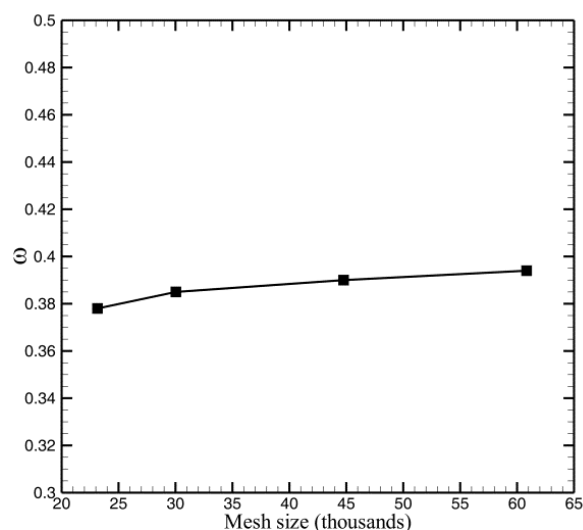
#### ۵-۲- اعتبارسنجی نتایج

برای اعتبارسنجی تحلیل عددی صورت گرفته، برای شرایط عملیاتی دمای بویلر ۱۳۰ °C و دمای اواپراتور ۱۰ °C و فشار کندانسور متغیر در بازه ۳۰mbar تا ۵۳ mbar مشخصه اجکتور و نیز فشار روی دیوار اجکتور در فشار پستی ۳۰mbar محاسبه شده و با نتایج آزمایشگاهی موجود در مرجع [۸] مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، مقدار نسبت مکش محاسبه‌شده در ناحیه‌ی بحرانی خطای بسیار کمی در حدود ۱٪ دارد. با توجه به شکل ۴، بیشترین مقادیر خطا در ناحیه مادون بحرانی دیده می‌شود. همچنین همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، بین



**Fig. 2** Structured grid for numerical simulation

شکل ۲ شبکه با سازمان شبیه‌سازی عددی



**Fig. 3** Entrainment ratio of the ejector by changing the size of the grid

شکل ۳ تغییرات نسبت دبی‌های جرمی اجکتور با تغییر اندازه‌ی شبکه

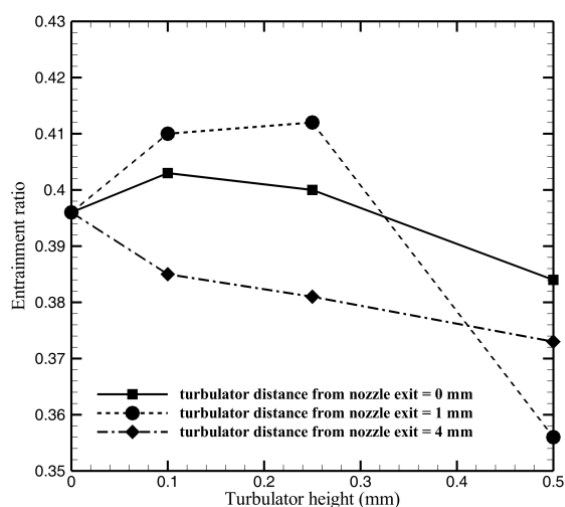


Fig. 6 Effect of turbulator height and position on entrainment ratio  
شکل ۶ نمودار اثر ارتفاع و موقعیت آشفته‌ساز بر نسبت دبی‌های جرمی

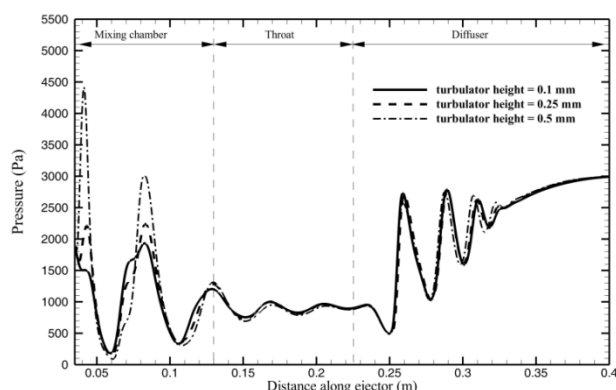


Fig. 7 Effect of turbulator height on static pressure distribution on the ejector axis

شکل ۷ نمودار اثر ارتفاع آشفته‌ساز بر توزیع فشار استاتیک روی محور اجکتور

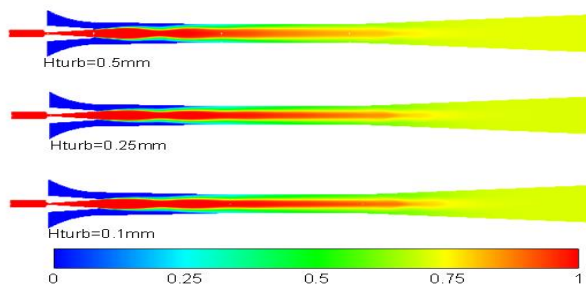


Fig. 8 Contour of primary flow mass fraction for turbulator with various heights located at the nozzle exit

شکل ۸ کانتور کسر جرمی سیال اولیه برای آشفته‌ساز با ارتفاع‌های مختلف واقع در خروجی نازل

ارتفاع‌های 0.1، 0.25 و 0.5 میلی‌متر است. آشفته‌ساز در فواصل 1، 0 و 4 میلی‌متر از خروجی نازل اولیه قرار داده شده است. در شکل 2 مقطع یک نمونه آشفته‌ساز واقع در خروجی نازل اولیه نشان داده شده است. در تمامی موارد بررسی شده اجکتور تحت شرایط عملیاتی با دمای سیال اولیه 130 °C، دمای سیال ثانویه 10 °C و فشار کندانسور 30 mbar قرار دارد.

### ۳-۱- بررسی اثر آشفته‌ساز بر نسبت دبی‌های جرمی

اثر ارتفاع و موقعیت قرارگیری آشفته‌ساز بر نسبت دبی‌های جرمی اجکتور در حالت بحرانی در شکل 6 نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، با دور شدن آشفته‌ساز از خروجی نازل حداکثر نسبت دبی‌های جرمی در ارتفاع آشفته‌ساز بالاتری رخ می‌دهد. با دور شدن بیش از اندازه از خروجی نازل حضور آشفته‌ساز باعث کاهش نسبت دبی‌های جرمی می‌شود. آشفته‌سازی با ارتفاع 0.25 mm که در فاصله 1 mm از خروجی نازل قرار گرفته است، نسبت دبی‌های جرمی را 4% افزایش می‌دهد.

### ۳-۲- بررسی اثر آشفته‌ساز بر توزیع فشار

حضور آشفته‌ساز در بخش واگرای نازل اولیه بدون توجه به موقعیت آن نسبت به خروجی نازل، تنها تغییرات فشار در نزدیکی محور اجکتور را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به عنوان نمونه اثر آشفته‌ساز واقع در خروجی نازل بر توزیع فشار محور اجکتور در شکل 7 نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، بیشترین تغییرات در محفظه اختلاط رخ داده است. در سری اول شوک‌ها در محفظه اختلاط قوی‌ترین شوک مایل مربوط به ارتفاع آشفته‌ساز 0.5 mm و ضعیف‌ترین شوک مایل مربوط به ارتفاع آشفته‌ساز 0.1 mm است.

### ۳-۳- بررسی اثر آشفته‌ساز بر لایه اختلاط

اختلاط دو جریان اولیه و ثانویه فرآیند مهمی است که عملکرد اجکتور را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به منظور بررسی لایه اختلاط به عنوان نمونه در شکل 8 کانتور کسر جرمی سیال اولیه برای آشفته‌ساز واقع در خروجی نازل با ارتفاع‌های مختلف نشان داده شده است. در طول جریان، کسر جرمی سیال اولیه در هسته‌ی مرکزی جت مافوق صوت کاهش می‌یابد؛ که به معنای رشد لایه اختلاط برشی در طول جریان است. افزایش ضخامت لایه اختلاط برشی تا از بین رفتن جت سیال اولیه خالص و اختلاط کامل دو سیال ادامه می‌یابد. به منظور بررسی کمی فرآیند اختلاط تغییرات ضخامت لایه اختلاط بررسی شده است. برای ضخامت لایه اختلاط تعاریف مختلفی ارائه شده است، در اینجا از لایه ضخامت موسوم به  $\delta_{10}$  استفاده شده است [10]. طبق این تعریف ضخامت لایه اختلاط فاصله بین دو نقطه در پروفیل سرعت است که اختلاف سرعت آنها 80% اختلاف سرعت دو جریان است. در شکل 9 جزئیات تعریف ضخامت  $\delta_{10}$  ارائه شده است. به عنوان نمونه در شکل 10 تغییرات ضخامت لایه اختلاط برای ارتفاع‌های مختلف آشفته‌ساز واقع در خروجی نازل نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود تغییرات ضخامت لایه اختلاط در ابتدای ناحیه اختلاط تابع ارتفاع آشفته‌ساز

نیست، اما بتدریج اثر ارتفاع آشفته‌ساز بر ضخامت لایه اختلاط آشکار می‌گردد. اثر ارتفاع و موقعیت قرارگیری آشفته‌ساز بر حجم لایه اختلاط در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، برای هر یک از موقعیت‌های قرارگیری آشفته‌ساز، نحوه تغییرات نسبت دبی‌های جرمی (شکل ۶) با نحوه تغییر حجم لایه اختلاط یکسان است. به بیان دیگر می‌توان تغییر در نسبت دبی‌های جرمی را مربوط به تغییر حجم لایه اختلاط دانست.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر موقعیت و ارتفاع آشفته‌ساز قرارگرفته در بخش واگرای نازل اولیه بر عملکرد اجکتور بخار بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که با قرارگرفتن آشفته‌ساز در فاصله معینی از خروجی نازل افزایش نسبت دبی‌های جرمی حداکثر است. همچنین با قرار دادن آشفته‌ساز در فاصله زیاد از خروجی نازل، حضور آشفته‌ساز باعث کاهش نسبت دبی‌های جرمی می‌شود. وجود آشفته‌ساز باعث تغییر توزیع فشار در محور اجکتور می‌شود و با افزایش ارتفاع آشفته‌ساز شوک‌های قوی‌تری در محفظه اختلاط رخ می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که افزایش نسبت دبی‌های جرمی را می‌توان به افزایش حجم ناحیه اختلاط مربوط دانست.

#### ۵- مراجع

- [1] Z. Aidoun, K. Ameer, M. Falsafioon, M. Badache, Current advances in ejector modeling, experimentation and application for refrigeration and heat pumps. Part 1: single-phase ejectors, *Inventions*, Vol. 4, 2019.
- [2] Y. J. Chang, Y. M. Chen, Enhancement of a steam jet refrigerator using a novel application of the petal nozzle, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 22, pp.203-211, 2000.
- [3] M. J. Oppenorth, D. Sederstrom, W. McDermott, C. S. Lengsfeld, Maximizing pressure recovery using lobed nozzles in a supersonic ejector, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 37, pp.396-402, 2012.
- [4] X. Yang, X. Long, X. Yao, Numerical investigation on the mixing process in a steam ejector with different nozzle structures, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol.56, pp 95-106, 2012.
- [5] F. S. Kong, H. D. Kim, Y. Jin, J. Setoguchi, Application of chevron nozzle to a supersonic ejector-diffuser system, *Procedia Engineering*, Vol. 56, pp.193-200, 2013.
- [6] S. M. V. Rao, G. Jagadeesh, Novel supersonic nozzles for mixing enhancement in supersonic ejectors, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 71, pp.62-71, 2014.
- [7] A. Hakkaki-Fard, Z. Aidoun, M. Ouzzane, A computational methodology for ejector design and performance maximisation, *Energy Conversion and Management*, Vol. 105, pp.1291-1302, 2015.
- [8] T. Sriveerakul, S. Aphornratana, K. Chunnanond, Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 1. validation of the cfd results, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 46, pp. 812-822, 2007.
- [9] T. Sriveerakul, S. Aphornratana, K. Chunnanond, Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 2. Flow structure of a steam ejector influenced by operating pressures and geometries, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 46, pp. 823-833, 2007.
- [10] K. Ariafar, D. Buttsworth, Gh. Al-Doori, R. Malpress, Effect of Mixing on the performance of wet Steam ejectors, *Energy*, Vol. 93, pp. 2030-2041, 2015.

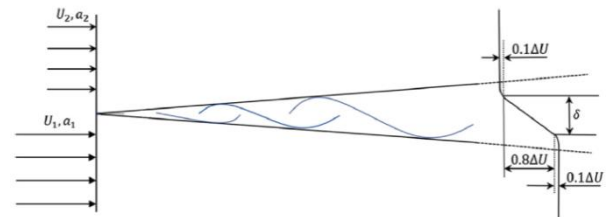


Fig. 9 Schematic of the mixing layer development downstream of the primary nozzle and the  $\delta_{10}$  definition

شکل ۹ شماتیک توسعه لایه اختلاط در پایین دست نازل اولیه و تعریف ضخامت لایه اختلاط  $\delta_{10}$  [10]

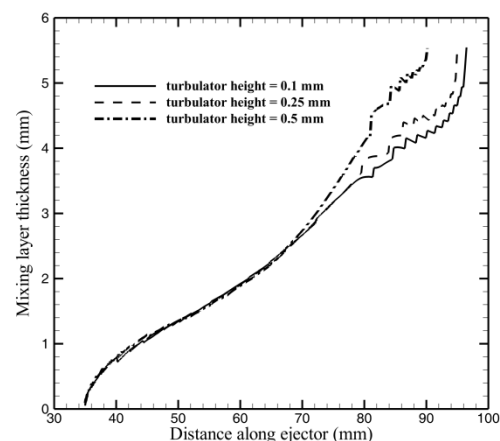


Fig. 10 Variation of mixing layer thickness for turbulator with various heights located at the nozzle exit

شکل ۱۰ تغییرات ضخامت لایه اختلاط برای آشفته‌ساز با ارتفاع‌های مختلف واقع در خروجی نازل

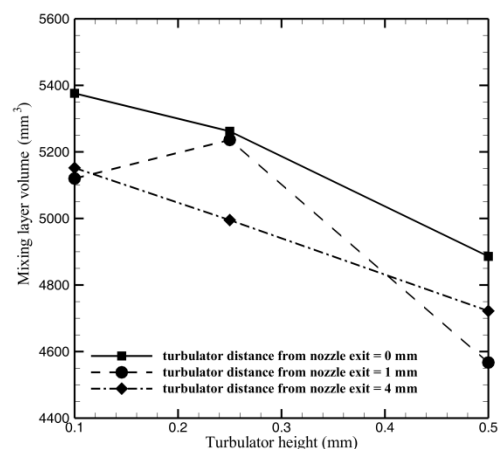


Fig. 11 Effect of turbulator height and position on mixing layer volume

شکل ۱۱ نمودار اثر ارتفاع و موقعیت آشفته‌ساز بر حجم لایه اختلاط