بررسی اثرآشفته­ساز بر عملکرد اجکتور بخار

شعبان علیاری شوره­دلی1\* ، علی گلپور2

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران

\* تهران، صندوق پستی 16785-163، sh\_alyari@sru.ac.ir

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 پارامتر های تاثیر گذار بر عملکرد اجکتور هندسه نازل اولیه است .در این مقاله اثر قرار دادن آشفته ساز در بخش واگرای 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 آشفته ساز با مقطع مستطیلی و به ارتفاع­های mm 0.1، mm 0.25 و mm 0.5 که در خروجی نازل و در فاصله mm 1 و mm 4 از خروجی نازل قرار گرفته­اند، اثر ارتفاع و موقعیت آشفته ساز 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 mm 1 از خروجی نازل و با ارتفاع 0.25 mm نسبت مکش نسبت به حالت بدون آشفته­ساز 4% افزایش می­یابد.

.

**کلی**د‌واژگ**ان**

اجکتور، لایه اختلاط، آشفته­ساز

Investigation of the Effect of Turbulator on Performance of Steam Ejector

Shaban Alyari Shourehdeli1\*, Ali Golpour2

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\_alyari@sru.ac.ir](mailto:email@address.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

1. 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 پژوهش ­های 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. چانگ وچن [2] به صورت تجربی اثر کاربرد نازل گلبرگی[[1]](#footnote-1) برعملکرد اجکتور را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با نسبت سطح اجکتور بزرگ، نازل گلبرگی نسبت تراکم، نسبت دبی های 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 لبه هایی[[2]](#footnote-2) 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 اثراستفاده از نازل­های مخروطی بیضی ،مستطیلی و صلیبی[[3]](#footnote-3) 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 های جرمی را افزایش داده و نازل­های مستطیلی و بیضی نسبت دبی­های جرمی را کاهش می­دهند. کونگ وهمکاران [5] استفاده از نازل چورون[[4]](#footnote-4) در اجکتور را به صورت عددی بررسی کردند. نتایج نشان داد که نسبت دبی­های جرمی تا 14% قابل افزایش است. رائو و جاگا دیش [6] برای بررسی اختلاط در اجکتور دو نازل مافوق صوت نوک حلقه ای[[5]](#footnote-5) ونازل بیضوی لبه­دار کم عمق نوک تیز[[6]](#footnote-6) را به صورت تجربی بررسی نمودند. هر دو نازل نسبت به نازل مخروطی دبی جرمی جریان ثانویه را 30% افزایش دادند. در حالی­که افت نسبت تراکم نسبت به نازل مخروطی در نازل لبه دار15%ودر 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 افت­های 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 آن‌ها 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 ایده­ی استفاده ازآشفته ساز در بخش واگرای نازل اولیه ارائه و بررسی شده است.

2- شبیه­سازی 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 نرم­افزار انسیس فلوئنت 2/17 استفاده شده است. معادلات غیر خطی حاکم به معادلات جبری تبدیل شده و بر روی سلول­های تشکیل­یافته حل شده است.

2-1- مشخصات هندسی اجکتور با نازل مخروطی استفاده‌شده در شبیه­سازی

اجکتور مورد استفاده در کار حاضر اجکتوری است که توسط سریویراکول 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، 8 mm،24 mm و 95 mm است. قابل ذکر است که در مطالعه سریویراکول و همکاران و کار حاضر فاصله خروجی نازل اولیه تا ورودی محفظه مکش مقداری ثابت و برابر NXP=35 mm (شکل 4) در نظر گرفته شده است.

2-2- روش حل عددی و تنظیمات حلگر

به دلیل مافوق صوت بودن جریان داخلی اجکتور جریان مورد نظر آشفته و تراکم­پذیر 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 جریان‌‌های دارای

|  |
| --- |
|  |
| **Fig. 1** Ejector geometry used in numerical simulation[9] |
| **شكل 1** هندسه اجکتور مورد استفاده در شبیه¬سازی عددی [9] |

چرخش، لایه‌‌های مرزی با گرادیان‌‌های 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 گسسته­سازی معادلات حاکم غیر خطی طرح بالادست مرتبه دوم استفاده شده است.

2-3- سیال عامل و شرایط مرزی

سیال عامل چرخه تبرید اجکتوری در مطالعه سریویراکول 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 ایده­ال بسیار نزدیک بوده و در نتیجه فرض گاز ایده­ال برای سیال عامل به کار رفته است. برای سیال اولیه، سیال ثانویه و سیال اختلاطی خروجی از اجکتور، گونه­های جریانی تعریف شده است. مشخصات ترمودینامیکی گونه­های جریانی با فرض بخار اشباع استخراج گردیده است. در کار حاضر دمای سیال اولیه برابر 130 oC ، دمای سیال ثانویه 10 oC و فشار کندانسور mbar 30 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 دیواره­ها عایق و صاف در نظر گرفته شده­اند. همچنین برای محور اجکتور شرط مرزی محور در نظر گرفته شده است.

2-4- تولید هندسه و استقلال از شبکه

جهت کاهش هزینه‌ی محاسباتی، جریان داخل اجکتور به‌صورت متقارن محوری در نظر گرفته شده است. به دلیل کیفیت بالاتر، هم­جهت بودن سلول­ها با جریان داخلی، کنترل­پذیری بهتر و اشغال حافظه کمتر شبکه باسازمان نسبت به شبکه بی­سازمان، در کار حاضر از شبکه باسازمان با سلول­های 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 شبکه‌ی محاسباتی، دقت محاسبات بهبود می‌یابد. توجه به این نکته ضروری است که ریز کردن شبکه تا حدی مجاز بوده و بعدازآن به‌جای بهبود دقت محاسبات خطای محاسباتی را افزایش می‌دهد. به همین علت جهت بررسی استقلال نتایج از شبکه، نسبت دبی­های جرمی اجکتور برای شبکه‌های مختلف مقایسه شده است. همان طور که در شکل 3 مشاهده می شود، با ریز کردن شبکه اختلاف بین مقادیر نسبت دبی­های جرمی ω کاهش می یابد. درنتیجه شبکه با 60838 سلول به عنوان شبکه ی پایه جهت تحلیل عددی انتخاب شده است.

2-5- اعتبارسنجی نتایج

برای اعتبارسنجی تحلیل عددی صورت گرفته، برای شرایط عملیاتی دمای بویلر130 oC و دمای اواپراتور 10 oCو فشار کندانسور متغیر در بازه 30mbar تا mbar 53 مشخصه اجکتور و نیز فشار روی دیوار اجکتور در فشار پشتی 30mbar محاسبه شده وبا نتایج آزمایشگاهی موجود در مرجع [8] مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل 4 نشان داده شده است، مقدار نسبت مکش محاسبه‌شده در ناحیه‌ی بحرانی خطای بسیار کمی در حدود 1% دارد. با توجه به شکل 4، بیشترین مقادیر خطا در ناحیه مادون بحرانی دیده می­شود. همچنین همانطور که در شکل 5 نشان داده شده است، بین

|  |
| --- |
|  |
| **Fig. 2** Structured grid for numerical simulation |
| **شكل2** شبکه باسازمان شبیه­سازی عددی |

|  |
| --- |
|  |
| Fig. 3 Entrainment ratio of the ejector by changing the size of the grid |
| شكل 3 تغییرات نسبت دبی­های جرمی اجکتور با تغییر اندازه‌‌ی شبکه |

|  |
| --- |
|  |
| **Fig. 4** Comparison of numerical results of entrainment ratio with experimental data |
| **شکل 4** نمودار مقایسه­ی نتایج عددی نسبت دبی­های جرمی با داده های آزمایشگاهی |

|  |
| --- |
|  |
| **Fig. 5** Comparison of numerical results of ejector wall pressure with experimental data |
| **شکل 5** نمودار مقایسه­ی نتایج عددی فشار روی دیوار اجکتور با داده های آزمایشگاهی |

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

3- اثر قرار گیری آشفته سازدر بخش واگرای نازل بر عملکرد اجکتور

در کار حاضر اثر قرارگیری یک اشفته ساز در بخش واگرای نازل اولیه بر عملکرد اجکتور بررسی شده است. مقطع آشفته ساز مستطیلی به طول1 و ارتفاع­های0.1، 0.25 و0.5 میلی­متراست. آشفته­ساز در فواصل 0 ،1 و4 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 oC، دمای سیال ثانویه 10 oCو فشار کندانسور 30 mbar قرار دارد.

3-1- بررسی اثر آشفته ساز بر نسبت دبی­های جرمی

اثر ارتفاع و موقعیت قرارگیری آشفته­ساز بر نسبت دبی­های جرمی اجکتور در حالت بحرانی در شکل6 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.

3-2- 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.

3-3- 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 اشفته­ساز 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 برشی­در طول جریان است. افزایش ضخامت لایه اختلاط برشی تا از بین رفتن جت سیال اولیه­ی 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 ارایه شده است، در اینجا از لایه ضخامت موسوم به δ10 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 δ10 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

|  |
| --- |
|  |
| **Fig. 6** Effect of turbulatorheight and position on entrainment ratio |
| **شکل 6** نمودار اثر ارتفاع و موقعیت آشفته­ساز بر نسبت دبی­های جرمی |

|  |
| --- |
|  |
| **Fig. 7** Effect of turbulatorheight on static pressure distribution on the ejector axis |
| **شکل 7** نمودار اثر ارتفاع آشفته­ساز بر توزیع فشار استاتیک روی محور اجکتور |

|  |
| --- |
| C:\Users\Lenovo\Desktop\106.tif |
| **Fig. 8** Contour of primary flow mass fraction for turbulator with various heights located at the nozzle exit |
| **شکل 8** کانتور کسرجرمی سیال اولیه برای آشفته­ساز با ارتفاع­های مختلف واقع در خروجی نازل |

|  |
| --- |
|  |
| Fig. 9 Schematic of the mixing layer development downstream of the primary nozzle and the δ10 definition |
| شکل 9 شماتیک توسعه لایه اختلاط در پایین دست نازل اولیه و تعریف ضخامت لایه اختلاط δ10 [10] |

|  |
| --- |
|  |
| **Fig. 10** Variation of mixing layer thickness for turbulator with various heights located at the nozzle exit |
| **شکل 10** تغییرات ضخامت لایه اختلاط برای آشفته­ساز با ارتفاع­های مختلف واقع درخروجی نازل |

|  |
| --- |
|  |
| **Fig. 11** Effect of turbulatorheight and position on mixing layer volume |
| **شکل 11** نمودار اثر ارتفاع و موقعیت آشفته­ساز بر حجم لایه اختلاط |

نیست، اما بتدریج اثر ارتفاع آشفته­ساز بر ضخامت لایه اختلاط آشکار می­گردد. اثر ارتفاع و موقعیت قرارگیری آشفته­ساز بر حجم لایه اختلاط در شکل 11 نشان داده شده است. همان­طور که در این شکل دیده می­شود، برای هر یک از موقعیت­های قرارگیری آشفته­ساز، نحوه تغییرات نسبت دبی­های جرمی (شکل 6) 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.

4- 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.

5- مراجع

[1] Z. Aidoun, K. Ameur, 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. Opgenorth, 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 computional methodology for ejector design and performance mximisation , *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.

1. Petal nozzle [↑](#footnote-ref-1)
2. Lobes [↑](#footnote-ref-2)
3. Cross-shaped [↑](#footnote-ref-3)
4. 4Chevron nozzle [↑](#footnote-ref-4)
5. Tip ring nozzle

   6Elliptic sharp tipped shallow lobed nozzle [↑](#footnote-ref-5)
6. [↑](#footnote-ref-6)