



DOR:

بررسی تجربی اثر نازل اولیه جریان موازی بر عملکرد اجکتور

شعبان علیاری شوره‌دلی^{۱*}، کامران مبینی^۲ و مصطفی گرجی^۳

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

^۳ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۲۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۷/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰

چکیده

هندسه نازل اولیه از پارامترهای موثر بر عملکرد اجکتور مافوق صوت است. در این پژوهش اثر استفاده از نازل اولیه جریان موازی بر عملکرد اجکتور مافوق صوت به صورت تجربی بررسی شده است. برای این منظور دو نازل اولیه مخروطی و جریان موازی با بخش‌های همگرای یکسان و نسبت سطح خروجی به سطح گلوگاه برابر استفاده شده است. منحنی بخش واگرای نازل جریان موازی به کمک روش مشخصه‌ها تعیین شده است. در موقعیت‌های مختلف نازل اولیه مشخصه عملکردی اجکتور با دو نازل اولیه مخروطی و جریان موازی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که در موقعیت نازل اولیه یکسان، با تغییر منحنی واگرای نازل اولیه از مخروطی به جریان موازی نسبت دبی‌های جرمی در هر دو ناحیه بحرانی و مادون بحرانی افزایش می‌یابد. در ناحیه بحرانی افزایش نسبت دبی‌های جرمی در موقعیت‌های نازل اولیه ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر به ترتیب برابر ۹/۵٪، ۴/۵٪ و ۴/۷٪ است. با تغییر منحنی بخش واگرای نازل اولیه موقعیت نازل اولیه بهینه تغییر می‌کند. در موقعیت نازل اولیه مناسب و بدون کاهش در فشار بحرانی بیشینه افزایش نسبت دبی‌های جرمی در ناحیه بحرانی ۸٪ است.

کلمات کلیدی: اجکتور؛ نازل اولیه؛ نازل جریان موازی؛ روش مشخصه‌ها.

Experimental Investigation of the Effect of Parallel-Flow Primary Nozzle on the Performance of the Ejector

S. Alyari Shourehdeli^{1*}, K. Mobini², M. Gorji³

¹ Assist. Prof., Mech. Eng., Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

² Assist. Prof., Mech. Eng., Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

³ M.Sc., Mech. Eng., Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

Abstract

Geometry of primary nozzle is one of the parameters that affect the performance of a supersonic ejector. In this paper, the effect of using parallel-flow primary nozzle on the performance of a supersonic ejector is experimentally investigated. For this purpose, two primary nozzles, conical and parallel-flow, with the same converging portion and the same ratio of exit surface to throat surface, have been used. The parallel-flow nozzle diverging curve is calculated using the characteristic method. At various positions of the primary nozzle, characteristic curves of the ejectors with conical and parallel-flow nozzles have been compared. The results show that by changing the primary nozzle diverging curve from conical to parallel-flow, at the same position of primary nozzle, the entrainment ratio increases in both critical and subcritical regions. In the critical region, entrainment ratios obtained by the primary nozzle positions 5 mm, 10 mm, and 15 mm are increased by 9.5%, 4.5% and 4.7%, respectively. The optimum position of the primary nozzle changes with changing the primary nozzle diverging curve. At the suitable position of the primary nozzles and without any reduction in critical pressure, the maximum relative increase of entrainment ratio in the critical region is 8%.

Keywords: Ejector; Primary Nozzle; Parallel-flow Nozzle; Method of Characteristics.

۱- مقدمه

اجکتورهای مافوق صوت به صورت گسترده در کاربردهای صنعتی مانند، سرمایه‌گذاری و نمک‌زدایی به کار می‌روند. نیلی و همکاران از اجکتور مافوق صوت برای ایجاد عدد ماخ مورد نظر در تونل باد فراصوت استفاده نمودند [۱]. طحانی و همکاران با استفاده از اجکتور در چرخه تبرید نشان دادند که مصرف انرژی تا ۳۵٪ کاهش می‌یابد [۲].

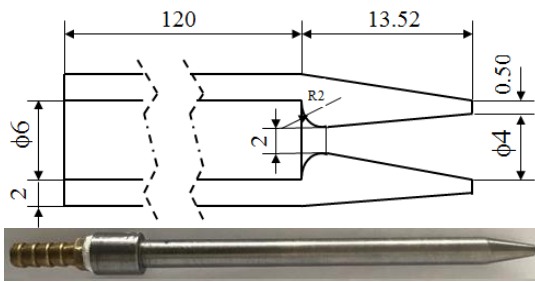
امروزه پژوهش‌های فراوانی در زمینه اثر پارامترهای هندسی بر عملکرد و فیزیک جریان داخلی اجکتور در حال انجام است [۳]. هندسه نازل اولیه از پارامترهای هندسی است که کمتر مورد توجه قرار گرفته است. چانگ و چن [۴] به صورت تجربی اثر کاربرد نازل گلبرگی^۱ بر عملکرد اجکتور را بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از نازل گلبرگی در اجکتورهایی با نسبت سطح بزرگ باعث افزایش نسبت تراکم، نسبت دبی‌های جرمی و فشار بحرانی اجکتور می‌شود. 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. آپگنوس و همکاران [۵] با اضافه کردن لبه‌هایی^۲ 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 بازافت فشار حداکثر است. یانگ و همکاران [۶] به کمک روش‌های دینامیک سیالات عددی، اثر استفاده از نازل‌های مخروطی بیضی، مستطیلی و صلیبی^۳ را بر عملکرد اجکتور بخار بررسی نمودند. آنها دریافتند که استفاده از این نازل‌ها فشار بحرانی را کاهش می‌دهد؛ همچنین نازل‌های صلیبی و مربعی نسبت دبی‌های جرمی را افزایش داده و نازل‌های مستطیلی و بیضی نسبت دبی‌های جرمی را کاهش می‌دهند. کونگ و همکاران [۷]، استفاده از نازل چورون^۴ در اجکتور را به صورت عددی بررسی کردند. نتایج نشان داد که نسبت دبی‌های جرمی تا ۱۴٪ قابل افزایش است. راثو و جاگادیش [۸] برای بررسی

اختلاط در اجکتور دو نازل مافوق صوت نوک حلقه‌ای^۵ و نازل بیضوی لبه‌دار کم عمق نوک تیز^۶ را به صورت تجربی بررسی نمودند. هر دو نازل نسبت به نازل مخروطی دبی جرمی جریان ثانویه را ۳۰٪ افزایش دادند. در حالی که افت نسبت تراکم نسبت به نازل مخروطی در نازل لبه‌دار ۱۵٪ و در نازل حلقه‌ای ۵۰٪ بود. حکاکی‌فرد و همکاران [۹] 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 روی دو اجکتور، نسبت مکش تا بیشتر از ۲۹٪ افزایش و فشارهای بحرانی در آن‌ها در حدود ۲/۶٪ 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. شوره‌دلی و همکاران [۱۰] اثر هندسه بخش واگرای نازل اولیه بر عملکرد اجکتور مافوق صوت بخار را به صورت عددی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که استفاده از نازل راو^۷ نسبت دبی‌های جرمی بحرانی را به میزان ۶/۳٪ و فشار پستی بحرانی را به میزان ۲٪ نسبت به نازل اولیه مخروطی افزایش می‌دهد.

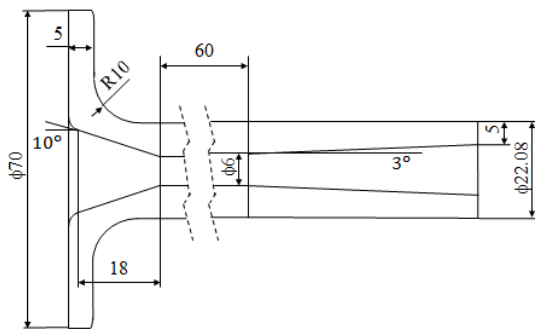
پژوهش‌گران در برخی موارد برای بررسی عملکرد اجکتورها از اجکتور هوا استفاده می‌کنند. الکادی و همکاران [۱۱] در بررسی تجربی اثر هندسه اجکتور مورد استفاده در نمک‌زدایی بر عملکرد آن از اجکتور هوا استفاده کردند؛ همچنین گاگان و همکاران [۱۲] به منظور بررسی عملکرد مدل‌های مختلف آشفتگی در محاسبات دینامیک سیالات عددی جریان داخلی اجکتور، در بررسی تجربی خود از اجکتور هوا استفاده کردند.

همان‌گونه که اشاره شد، اثر نازل اولیه جریان موازی بر عملکرد اجکتور به صورت عددی در پژوهش‌های حکاکی‌فرد و همکاران [۹] و شوره‌دلی و همکاران [۱۰] مورد توجه قرار گرفته است؛ اما بررسی مقالات توسط نویسندگان مقاله حاضر نشان داده است که تا کنون اثر نازل اولیه جریان موازی بر عملکرد اجکتور به صورت تجربی بررسی نشده است؛ بنابراین

^۱ Petal Nozzle^۲ Lobes^۳ Cross-Shaped^۴ Chevron Nozzle^۵ Tip Ring Nozzle^۶ Elliptic Sharp Tipped Shallow Lobed Nozzle^۷ Rao Nozzle



شکل ۱- نقشه و تصویر نازل اولیه مخروطی (ابعاد در نقشه بر حسب میلی‌متر هستند)



شکل ۲- نقشه محفظه اختلاط و دیفیوزر (ابعاد در نقشه بر حسب میلی‌متر هستند)

طراحی اجکتور زاویه واگرایی دیفیوزر ۳ درجه در نظر گرفته شده است.

برای تعیین قطر خروجی دیفیوزر از رابطه نیمه تجربی ارائه شده توسط کوهن [۱۶] استفاده شده است. طبق این رابطه تجربی قطر خروجی دیفیوزر ۱۲ mm محاسبه شده است. در شکل ۲ نقشه محفظه اختلاط و دیفیوزر نشان داده شده است.

۳-۲- مشخصات هندسی نازل اولیه جریان موازی

نازل همگرا- واگرایی که جریان در خروجی آن به صورت یکنواخت و موازی باشد؛ نازل جریان موازی نامیده می‌شود.

نازل جریان موازی برای عدد ماخ خروجی مشخص طراحی می‌شود. جهت داشتن جریان موازی با عدد ماخ مشخص در خروجی نازل، با معلوم بودن پروفیل بخش همگرا و گلوگاه نازل و مشخصات ترمودینامیکی سیال، منحنی واگرا محاسبه می‌شود. هندسه جریان در نزدیکی گلوگاه در شکل ۳ نشان

در این مقاله اثر استفاده از نازل اولیه جریان موازی بر عملکرد اجکتور هوا به صورت تجربی بررسی شده است.

۲- طراحی اجکتور

به منظور بررسی تجربی اثر نازل اولیه جریان موازی بر عملکرد اجکتور مجموعه آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است. در این بخش طراحی اجزاء سیستم بر مبنای مدل- سازی یک بعدی اجکتور، استانداردهای طراحی اجکتور و محدودیت‌های عملی موجود ارائه شده است.

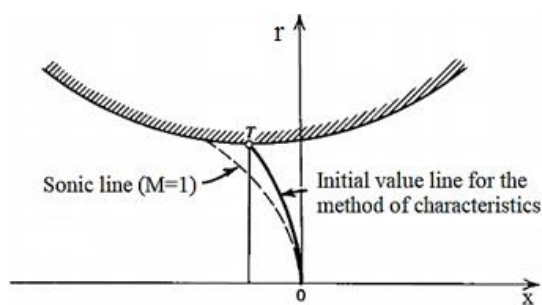
۱-۲- مشخصات هندسی نازل اولیه

با توجه به محدودیت حجم مخزن موجود قطر گلوگاه نازل اولیه ۲ mm و فشار اولیه نسبی ۵ bar در نظر گرفته شده است؛ همچنین با توجه به امکانات ساخت در دسترس عدد ماخ خروجی نازل اولیه برابر ۳ در نظر گرفته شده است. برای این عدد ماخ قطر خروجی نازل اولیه مورد نیاز ۴ mm است. ضخامت نوک نازل در فرآیند اختلاط موثر است و تا حد ممکن باید نازک باشد [۱۳]؛ بنابراین ضخامت نوک نازل ۰/۵ mm در نظر گرفته شده است. تصویر نازل اولیه مخروطی و نقشه مربوط به آن در شکل ۱ ارائه شده است.

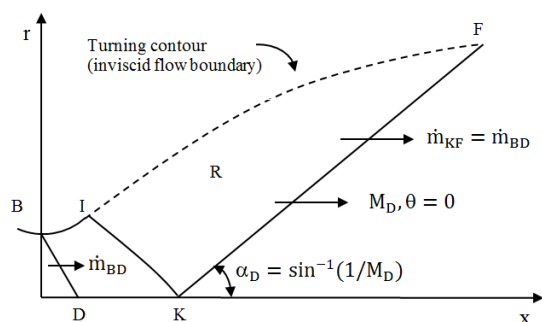
۲-۲- مشخصات هندسی اجکتور

با معلوم بودن فشار بحرانی اجکتور به کمک مدل یک بعدی هوانگ و همکاران [۱۴] می‌توان نسبت قطر گلوگاه اجکتور به قطر خروجی نازل اولیه و نسبت دبی‌های جرمی بحرانی را تخمین زد. با در نظر گرفتن نسبت فشار بحرانی در محدوده ۱/۲-۱/۳ به کمک مدل هوانگ و همکاران قطر گلوگاه اجکتور حدود ۶ mm و نسبت دبی‌های جرمی حدود ۰/۸ به دست آمده است.

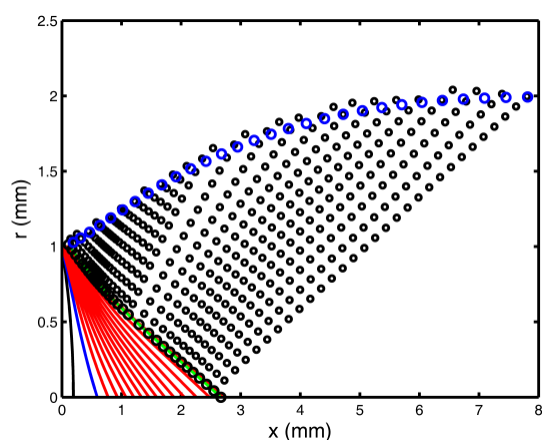
بر اساس توصیه‌های استاندارد ESDU [۱۵] نسبت طول گلوگاه اجکتور به قطر آن باید در محدوده ۱۰-۸ باشد. از آن جایی که عدد ماخ در نازل اولیه بالا است باید نسبت طول به قطر گلوگاه اجکتور به حد بالایی این محدوده نزدیک باشد؛ بنابراین در طراحی اجکتور نسبت طول به قطر گلوگاه برابر ۱۰ در نظر گرفته شده است؛ همچنین بر اساس توصیه‌های استاندارد مذکور زاویه دیفیوزر باید بین ۵-۳ درجه باشد. در



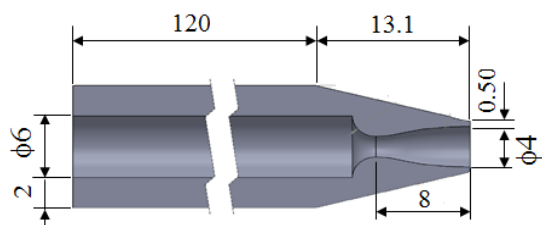
شکل ۳- خط صوتی و خط مقدار اولیه [۱۷]



شکل ۴- تعیین مشخصات جریان خروجی نازل جریان موازی [۱۷]



شکل ۵- مشخصه‌ها و منحنی واگرایی نازل جریان موازی



شکل ۶- نقشه نازل جریان موازی (ابعاد در نقشه بر حسب میلی‌متر هستند)

داده شده است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، محاسبات جریان مافوق صوت در بخش واگرایی نازل به کمک روش مشخصه‌ها نیازمند خط مقدار اولیه است. خط مقدار اولیه از حل میدان جریان در ناحیه گلوگاه نازل به کمک روش اغتشاش کوچک به دست می‌آید. خط مقدار اولیه کمی پایین‌تر از خط صوتی است و مکان هندسی نقاطی است که مولفه شعاعی سرعت در آنها صفر است. با معلوم بودن بخش ابتدایی منحنی واگرا (منحنی BI در شکل ۴) و مشخصات خط مقدار اولیه، میدان جریان محدود به بخش ابتدایی منحنی واگرا به دست می‌آید. این ناحیه کرنل^۱ نامیده می‌شود. با توجه به شکل ۴ ناحیه کرنل محدود به منحنی BI است. روی مشخصه راست گرد IK و در محور تقارن نازل یعنی نقطه K عدد ماخ برابر عدد ماخ طراحی است. میدان جریان خروجی از نازل می‌بایست یکنواخت، موازی و با عدد ماخ طراحی باشد. در این ناحیه تمام مشخصه‌ها به صورت خط راست بوده و نسبت به محور تقارن زاویه‌ی یکسان α_D دارند؛ بنابراین مطابق شکل ۴ مشخصه‌ی موردنظر از نقطه K شروع شده و با زاویه α_D تا نقطه‌ی F امتداد می‌یابد. موقعیت هندسی نقطه F جایی است که دبی جرمی عبوری از خط KF با دبی جرمی عبوری از خط مقدار اولیه (BD) یکسان باشد. بعد از مشخص شدن موقعیت آخرین نقطه منحنی واگرایی نازل (نقطه F)، جهت تعیین موقعیت دیگر نقاط منحنی بین F و I می‌بایست میدان جریان در ناحیه R حل شود. برای هر نقطه انتخابی روی خط KF مشخصه راست گرد مربوطه محاسبه شده و با موازنه جرم در امتداد این مشخصه نقطه جدیدی از دیوار بین نقاط I و F به دست می‌آید. در امتداد خط KF و برای نقاط پی در پی این عمل انجام می‌شود تا کل نقاط دیوار بین نقاط I و F به دست آید [۱۷]. در کار حاضر برای محاسبه منحنی واگرایی نازل اولیه جریان موازی از نسبت سطح و عدد ماخ خروجی مربوط به نازل مخروطی استفاده شده است. برای ترسیم منحنی واگرایی نازل اولیه جریان موازی، از کدنویسی در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. در شکل ۵ مشخصه‌ها و منحنی واگرایی نازل جریان موازی به کمک روش مشخصه‌ها ترسیم شده است. در شکل ۶ نقشه نازل اولیه جریان موازی ارائه شده است.

^۱ Kernel

۳- مجموعه آزمایشگاهی

مجموعه آزمایشگاهی شامل اجکتور، مانومترها و مجموعه ارفیس در شکل ۷ نشان داده شده است؛ همچنین تصویر و نقشه مجموعه اجکتور در شکل ۸ ارائه شده است. برای اندازه‌گیری فشار پشتی از یک مانومتر جیوه‌ای و برای اندازه‌گیری دبی جرمی از مجموعه ارفیس استفاده شده است.

اختلاف فشار در ارفیس به وسیله مانومتر آب اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به مشخصات هندسی نازل اولیه و عملکرد مجموعه اجکتور، ارفیس صفحه نازک با ورودی مخروطی برای محدوده دبی جرمی ۳-۶ گرم بر ثانیه طراحی شده است [۱۸]. قطر ارفیس طراحی شده ۱۴ mm است.

۴- نحوه انجام آزمایش

برای ذخیره هوای فشرده مورد نیاز از مخزنی به حجم ۵۰۰ لیتر استفاده شده است. قبل از انجام آزمایش به کمک کمپرسور فشار داخل مخزن به ۱۱ bar رسانده می‌شود. در

طی آزمایش به کمک رگولاتور فشار، فشار جریان اولیه در فشار نسبی ۵ bar ثابت نگه داشته می‌شود. فشار جریان ثانویه نیز ثابت و برابر فشار محیط است. فشار پشتی نیز به کمک شیر تنظیم فشار پشتی از فشار محیط تا فشار جریان برگشتی (فشاری پشتی که باعث جریان معکوس در ورودی ثانویه می‌شود) تنظیم می‌شود. به منظور مقایسه بهتر عملکرد اجکتور با دو نازل اولیه مخروطی و جریان موازی، در هر دو اجکتور نسبت فشارهای پشتی از ۱/۰۵۷ تا نسبت فشار جریان برگشتی با فواصل ۰/۰۳ در نظر گرفته شده است. در هر مرحله پس از پایدار شدن سیستم مانومترها قرائت می‌شود. به منظور کاهش خطاهای احتمالی هر سری آزمایش سه مرتبه تکرار شده است.

۵- تحلیل خطاها و بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها

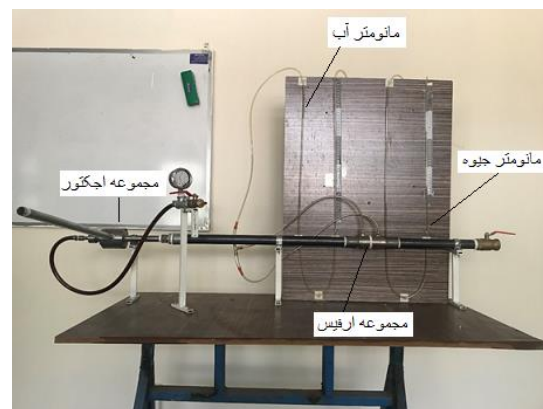
خطای تخمینی قرائت مانومتر جیوه‌ای و مانومتر آب به ترتیب برابر ۰/۵ mmHg و ۰/۵ mmH₂O است؛ بنابراین دقت اندازه‌گیری فشار پشتی و اختلاف فشار در ارفیس به ترتیب ۱ mmHg و ۱ mmH₂O ± خواهد بود؛ همچنین خطای تخمینی تعیین ضریب تخلیه، سطح ارفیس و دما به ترتیب ۱/۱ ± و ۰/۵ mm² ± و ۱ °C ± است. رابطه دبی جرمی در ارفیس نیز به صورت رابطه (۱) است:

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{P_b + \frac{1}{2}\Delta P_w}{R_a T}} C_d A_d \sqrt{\frac{2\Delta P_w}{1 - \beta^4}} \quad (1)$$

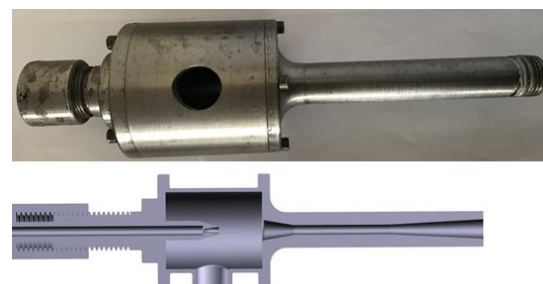
بنابراین با توجه به رابطه دبی جرمی در ارفیس و خطاهای تخمینی اندازه‌گیری متغیرهای مذکور می‌توان خطای تخمینی اندازه‌گیری دبی جرمی را از رابطه (۲) به دست آورد [۱۹]:

$$\frac{\Omega_{\dot{m}}}{\dot{m}} = \left[\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial C_d} \Omega_{C_d} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial A_d} \Omega_{A_d} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial T} \Omega_T \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \Delta P_w} \Omega_{P_w} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial P_b} \Omega_{P_b} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

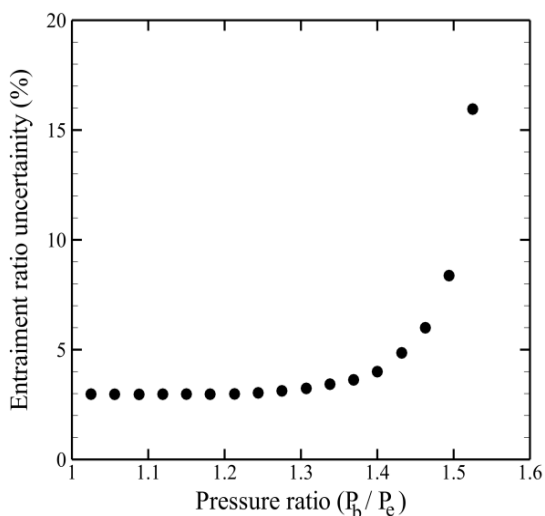
بررسی خطای تخمینی در کلیه آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که حداکثر درصد خطای تخمینی دبی جرمی جریان مخلوط ۱/۷٪ و حداکثر درصد خطای تخمینی دبی جرمی جریان اولیه ۱/۳٪ است.



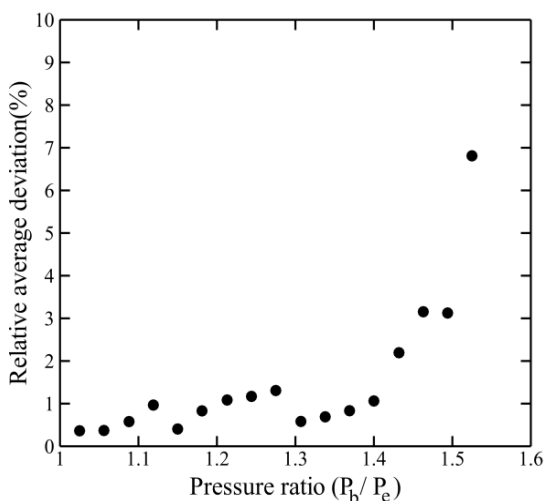
شکل ۷- تصویر مجموعه آزمایشگاهی



شکل ۸- تصویر و نقشه مجموعه اجکتور



شکل ۹- درصد خطای تخمینی اندازه‌گیری نسبت دبی‌های جرمی



شکل ۱۰- انحراف متوسط نسبی نسبت دبی‌های جرمی

از نازل جریان موازی باعث افزایش نسبت دبی‌های جرمی در ناحیه مادون بحرانی می‌شود؛ همچنین جمع‌بندی نتایج تجربی و تئوری ارائه شده در مورد اثر موقعیت خروجی نازل اولیه بر عملکرد اجکتور حاکی از آن است که این اثر بسیار تابع نوع سیال، هندسه و شرایط کاری است [۳].

۶-۱- مشخصه عملکردی اجکتور با نازل مخروطی

مشخصه عملکردی اجکتور با نازل مخروطی در سه موقعیت ۵ mm، ۱۰ mm و ۱۵ mm نسبت به ورودی گلوگاه اجکتور

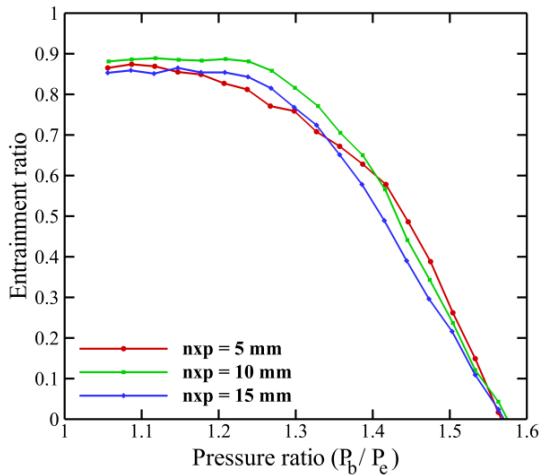
در پژوهش‌های تجربی مشابه دقت اندازه‌گیری فشار توسط ترانس‌دیوسرها کمتر از ۳ kPa و خطای تخمینی اندازه‌گیری دبی جرمی توسط ارفیس و یا دیگر انواع دبی‌سنج‌ها کمتر از ۰.۴٪ است. همان‌گونه که ملاحظه شد، در اینجا دقت اندازه‌گیری فشار توسط مانومتر جیوه‌ای حدود ۱/۳ kPa و خطای تخمینی اندازه‌گیری دبی جرمی جریان مخلوط ۱/۷٪ است.

با معلوم بودن درصد خطای تخمینی دبی‌های جرمی جریان مخلوط و جریان اولیه می‌توان درصد خطای تخمینی دبی جرمی جریان ثانویه و نسبت دبی‌های جرمی را تعیین نمود. به عنوان نمونه درصد خطای تخمینی نسبت دبی‌های جرمی در طی یک آزمایش در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، درصد خطای تخمینی نسبت دبی‌های جرمی در ناحیه بحرانی کم است و با نزدیک شدن به فشار پشتی برگشتی افزایش می‌یابد. بررسی کلیه داده‌های آزمایش‌ها نشان می‌دهد که حداکثر درصد خطای تخمینی نسبت دبی‌های جرمی تا حدود نسبت فشار پشتی نسبی ۱/۵ کمتر از ۰.۸٪ است و در نزدیکی فشار پشتی برگشتی درصد خطای تخمینی نسبت دبی‌های جرمی ممکن است تا ۱.۸٪ نیز برسد.

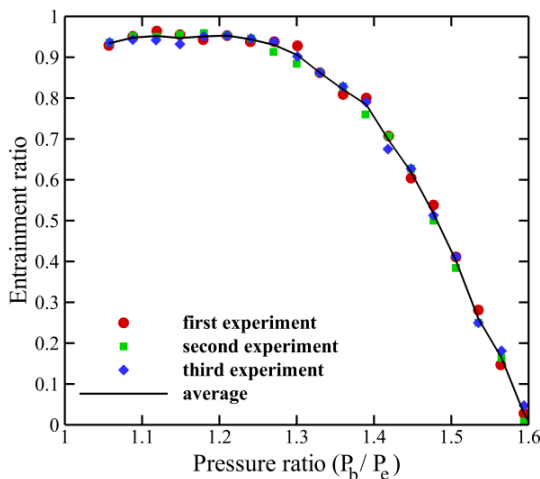
از آن جایی که هر آزمایش سه بار تکرار شده است برای بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها از انحراف متوسط نسبی استفاده شده است. به عنوان نمونه انحراف متوسط نسبی نسبت دبی‌های جرمی در طی یک آزمایش در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بررسی داده‌های آزمایش‌ها نشان می‌دهد که انحراف متوسط نسبی نسبت دبی‌های جرمی در محدوده عملکرد بحرانی اجکتور کمتر از ۰.۲٪ است؛ اما در نزدیکی فشار پشتی برگشتی به دلیل عملکرد ناپایدار اجکتور انحراف متوسط نسبی نسبت دبی‌های جرمی بالا است.

۶- نتایج و بحث

در این بخش مشخصه عملکردی اجکتور با نازل اولیه مخروطی و نازل اولیه جریان موازی در موقعیت‌های مختلف خروجی نازل اولیه نسبت به ورودی گلوگاه اجکتور (npx) بررسی شده است. اخیراً شوره‌دلی و همکاران [۱۰ و ۲۰] با بررسی عددی عملکرد اجکتور بخار نشان دادند که استفاده



شکل ۱۲- مشخصه عملکردی اجکتور با نازل اولیه مخروطی در موقعیت‌های مختلف



شکل ۱۳- مشخصه عملکردی اجکتور با نازل اولیه جریان موازی (n_xp = 5 mm)

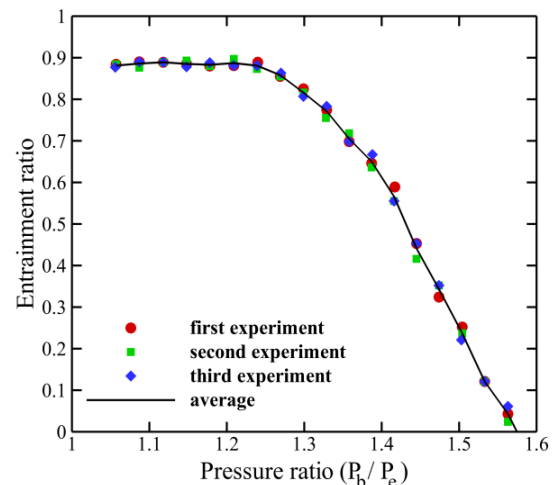
۲-۶- مشخصه عملکردی اجکتور با نازل جریان موازی مشخصه عملکردی اجکتور با نازل جریان موازی در سه موقعیت ۵ mm، ۱۰ mm و ۱۵ mm نسبت به ورودی گلوگاه اجکتور تعیین شده است. به عنوان نمونه نتایج سه سری آزمایش در موقعیت ۵ mm در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در شکل ۱۴ نیز مقادیر متوسط نسبت دبی‌های جرمی برای سه موقعیت نازل اولیه مذکور ارائه شده است.

همان‌گونه که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، تغییر موقعیت نازل جریان موازی نسبت به گلوگاه اجکتور اثر

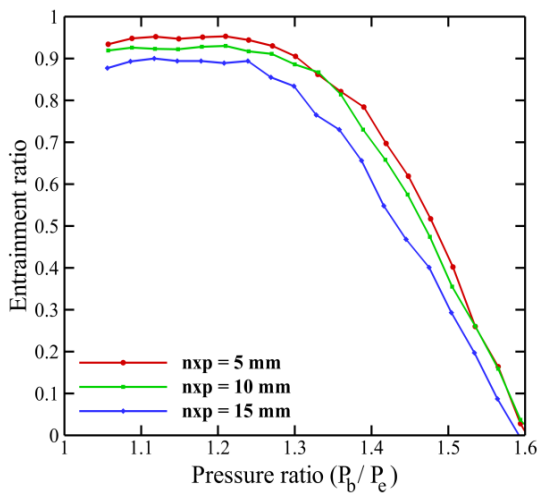
تعیین شده است. به عنوان نمونه نتایج سه سری آزمایش در موقعیت ۱۰ mm در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در شکل ۱۲ نیز مقادیر متوسط نسبت دبی‌های جرمی برای سه موقعیت نازل اولیه مذکور ارائه شده است.

همان‌گونه که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، با دور شدن خروجی نازل اولیه مخروطی از گلوگاه اجکتور فشار بحرانی افزایش یافته و سپس ثابت باقی می‌ماند. در موقعیت‌های n_xp = ۱۰ mm و n_xp = ۱۵ mm نسبت فشار بحرانی $P_b^*/P_e = 1/12$ و در موقعیت‌های $P_b^*/P_e = 1/24$ است؛ همچنین نسبت دبی‌های جرمی در این سه موقعیت به ترتیب برابر ۰/۸۷، ۰/۸۸ و ۰/۸۵ است؛ بنابراین موقعیت n_xp = ۱۰ mm موقعیت مناسب قرار گیری نازل اولیه است، زیرا در این موقعیت فشار بحرانی و نسبت دبی‌های جرمی هر دو مقادیر بالاتری دارند.

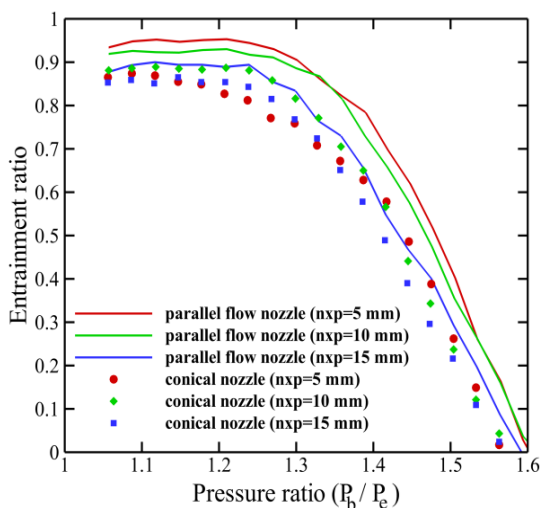
تحلیل دینامیک سیالات عددی اجکتور بخار توسط پیانسونگ و همکاران [۲۱] نیز نشان داده است که برای شرایط کاری معین تنها یک موقعیت خروجی نازل اولیه بهینه وجود دارد که در آن نسبت دبی‌های جرمی حداکثر است؛ زیرا با دور شدن خروجی نازل اولیه از گلوگاه اجکتور سطح موثر در گلوگاه اجکتور بزرگتر شده و در نتیجه نسبت دبی‌های جرمی افزایش می‌یابد؛ اما با بیشتر شدن فاصله خروجی نازل اولیه اندازه حرکت جریان اولیه کاهش یافته و نسبت دبی‌های جرمی کم می‌شود.



شکل ۱۱- مشخصه عملکردی اجکتور با نازل اولیه مخروطی (n_xp = 10 mm)



شکل ۱۴- مشخصه عملکردی اجکتور با نازل اولیه جریان موازی در موقعیت‌های مختلف



شکل ۱۵- مشخصه عملکردی اجکتور با نازل اولیه مخروطی و جریان موازی در موقعیت‌های مختلف

نسبت دبی‌های جرمی اجکتور بیشتر است. با این حال تفسیر دقیق‌تر اختلاف عملکرد دو اجکتور با نازل مخروطی و جریان موازی نیازمند بررسی‌های تجربی جهت مشاهده الگوی جریان خصوصا در ناحیه اختلاط است.

۷- جمع‌بندی

در این پژوهش اثر نازل اولیه جریان موازی بر عملکرد اجکتور به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور

چندانی بر نسبت فشار بحرانی ندارد و نسبت فشار بحرانی تقریبا $P_b^*/P_e = 1/24$ است؛ همچنین نسبت دبی‌های جرمی با دور شدن نازل جریان موازی از گلوگاه اجکتور کاهش می‌یابد. در سه موقعیت ۵ mm، ۱۰ mm و ۱۵ mm نسبت به ورودی گلوگاه اجکتور نسبت دبی‌های جرمی به ترتیب برابر ۰/۹۵، ۰/۹۲ و ۰/۸۹ است.

در ناحیه مادون بحرانی و تا نزدیکی نسبت فشار پستی برگشتی همانند ناحیه بحرانی حداکثر نسبت دبی‌های جرمی در موقعیت ۵ mm و حداقل نسبت دبی‌های جرمی در موقعیت ۱۵ mm به دست می‌آید. با نزدیک شدن به نسبت فشار پستی برگشتی اختلاف دو منحنی مربوط به موقعیت‌های ۵ mm و ۱۰ mm از بین می‌رود.

۶-۳- مقایسه مشخصه عملکردی اجکتور با نازل

مخروطی و اجکتور با نازل جریان موازی

مشخصه عملکردی اجکتور با دو نازل اولیه مخروطی و جریان موازی در سه موقعیت خروجی نازل اولیه نسبت به گلوگاه اجکتور ۵ mm، ۱۰ mm و ۱۵ mm در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، در موقعیت‌های یکسان نازل اولیه هم در ناحیه بحرانی و هم در ناحیه مادون بحرانی نسبت دبی‌های جرمی با نازل جریان موازی بیشتر است. در ناحیه بحرانی درصد افزایش نسبت دبی‌های جرمی در موقعیت‌های نازل اولیه ۵ mm، ۱۰ mm و ۱۵ mm به ترتیب برابر ۰/۹۲، ۰/۴۵ و ۰/۴۷ است؛ همچنین مقایسه بیشترین نسبت دبی‌های جرمی یعنی نسبت دبی‌های جرمی با نازل مخروطی در موقعیت $n_{xp} = 10$ mm و نازل جریان موازی در موقعیت $n_{xp} = 5$ mm افزایش ۰/۸ را نشان می‌دهد. این افزایش در نسبت دبی‌های جرمی بدون کاهش در نسبت فشار بحرانی است.

مطالعات CFD حکاک‌فرد و همکاران [۹] نشان داده است که با طراحی بخش واگرای نازل اولیه به وسیله روش مشخصه‌ها اتلافات کاهش یافته و جریان، نازل را به صورت جریانی موازی ترک می‌کند؛ همچنین بررسی عددی اثر نازل اولیه جریان موازی بر عملکرد اجکتور بخار توسط شوره‌دلی و همکاران [۲۰] نشان داده است که با نازل جریان موازی در ناحیه مادون بحرانی، اندازه حرکت منتقل شده به جریان ثانویه بیشتر و حجم ناحیه اختلاط بزرگتر است و در نتیجه

- [4] Chang YJ, Chen YM (2000) Enhancement of a steam jet refrigerator using a novel application of the petal nozzle. *Exp Therm Fluid Sci* 22: 203-211.
- [5] Opgenorth MJ, Sederstrom D, McDermott W, Lengsfeld C S (2012) Maximizing pressure recovery using lobed nozzles in a supersonic ejector. *Appl Therm Eng* 37: 396-402.
- [6] Yang X, Long X, Yao X (2012) Numerical investigation on the mixing process in a steam ejector with different nozzle structures. *J Therm Sci* 56: 95-106.
- [7] Kong FS, Kim HD, Jin Y, Setoguchi J (2013) Application of chevron nozzle to a supersonic ejector-diffuser system. *Procedia Eng* 56: 193-200.
- [8] Rao SMV, Jagadeesh G (2014) Novel supersonic nozzles for mixing enhancement in supersonic ejectors. *Appl Therm Eng* 71: 62-71.
- [9] Hakkaki-Fard A, Aidoun Z, Ouzzane M (2015) A computational methodology for ejector design and performance maximisation. *Energ Convers Manage*. 105: 1291-1302.
- [10] Shourehdeli S A, Mobini K, Asakereh A (2019) Numerical investigation of the effects of primary nozzle diverging portion on performance of the supersonic ejector of an ejector refrigeration cycle. *Int J Air-Cond Refrig* 27(3).
- [11] Elkady M, Karameldin A, Negeed R, El-Bayoumy R (2008) Experimental investigation of the effect of ejector geometry on its performance. *Int J Nucl Desalin* 3: 215-219.
- [12] Gagan J, Smierciew K, Butrymowicz D, Karwacki J (2014) Comparative study of turbulence models in application to gas ejectors. *Int J Therm Sci* 78: 9-15.
- [13] ESDU (1985) Ejector and pump. Data item 85032. ESDU Int Ltd, London.
- [14] Huang BJ, Chang JM, Wang CP, Petrenko VA (1999) A 1-D analysis of ejector performance. *Int J Refrig* 22: 354-364.
- [15] ESDU (2011) Ejector and pump. Data item 92042. ESDU Int Ltd, London.
- [16] Ablwaifa AE (2006) A theoretical and experimental investigation of jet-pump refrigeration system. PhD Thesis, University of Nottingham.
- [17] Zucrow MJ, Hoffman JD (1977) Gas dynamics. Wiley, New York.
- [18] White FM (2001) Fluid mechanics. 4th edn. McGraw-Hill, New York.
- [19] Holman J. P. (2012) Experimental Methods for Engineers. Mc-Graw-Hill, New York.

عملکرد اجکتور با دو نازل اولیه مخروطی و جریان موازی با نسبت سطح برابر مقایسه گردید. نتایج نشان داد که در هر دو ناحیه بحرانی و مادون بحرانی و در موقعیت یکسان نسبت به ورودی گلوگاه اجکتور، استفاده از نازل جریان موازی باعث افزایش نسبت دبی‌های جرمی می‌شود. الگوی تغییر مشخصه عملکردی اجکتور بر حسب تغییر موقعیت قرارگیری نازل اولیه در دو حالت نازل اولیه مخروطی و نازل جریان موازی متفاوت است. نسبت دبی‌های جرمی حداکثر با نازل جریان موازی ۸٪ بیشتر از مقدار مشابه برای نازل مخروطی است. شایان ذکر است که این افزایش در نسبت دبی‌های جرمی بدون کاهش در فشار بحرانی است.

۸- فهرست علائم

سطح ارفیس، m^2	A_d
ضریب تخلیه ارفیس	C_d
دبی جرمی، Kg/s	\dot{m}
اختلاف فشار در مانومتر آب، Pa	ΔP_w
فشار پشتی، Pa	P_b
ثابت هوا، J/KgK	R_a
دما، K	T
نسبت قطر ارفیس به قطر لوله	β
خطای تخمینی	Ω

۹- مراجع

- [۱] نیلی ا م، روشنی م، ربیعی ع (۱۳۹۰) طراحی یک بعدی اجکتور یک، دو و سه مرحله‌ای تونل باد فراصوتی. *مجله مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۶۸-۵۸: ۲.
- [۲] طحانی م، شمس‌الدینی س، فراهت س (۱۳۹۴) شبیه‌سازی ترمودینامیکی کولرهای اجکتوری-تراکمی. *مجله مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۱۸۷-۱۷۹: ۵(۲).
- [3] Aidoun Z, Ameer K, Falsafioon M, Badache M (2019) Current advances in ejector modeling, experimentation and application for refrigeration and heat pumps. part 1: single-phase ejectors. *Inventions* 4(1).

[21] Pianthong K, Sehanam W, Behnia M, Sriveerakul T, Aphornratana S (2007) Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique. *Energ Convers Manage* 48: 2556-2564.

[۲۰] شوره‌دلی ش ع، مبینی ک، عساکره ع (۱۳۹۹) بررسی عددی اثر نازل جریان موازی بر عملکرد اجکتور مافوق صوت یک چرخه تبرید اجکتوری. *مجله مهندسی مکانیک تبریز* ۲۴۳-۲۳۹: ۵(۴).