مطالعه تجربی بر روی عملکرد نازلهای غیر مخروطی برای اجکتورهای دو فازی بخار و هوا

ما معید اکبرنژاد دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، saeed_akbarnejad@yahoo.com مسعود ضیاء بشرحق^{*} استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، ایران، mzia@kntu.ac.ir

چکیدہ

این مقاله برای اولین بار طرحهای جدیدی از نازل فرا صوت اولیه با مقطع غیر دایرهای را برای افزایش نسبت مکش یک اجکتور دو فازی بخار و هوا معرفی می کند. با انجام آزمایشهای تجربی تأثیر این نازلها با طراحی جدید که شامل نازل با سطح مقطع ستاره، مربع ساده، مربعی تابیده شده در جهت محور نازل، یک طرح خاص و مقطع دایرهای ساده به عنوان نازل مرجع، بر روی عملکرد اجکتور بررسی شد. با توجه به محدودیتهای روشهای ماشین کاری سنتی امکان ساخت این هندسهها در گذشته وجود نداشت. در این پژوهش با استفاده از پرینتر سه بعدی و ماده مقاوم به دما در شرایط عملیاتی مورد نیاز، نازلها با هندسه جدید ساخته شدند و عملکرد آنها با نازل معمولی مخروطی مقایسه شد. نتایج نشان داد که نازلهای جدید توانایی افزایش نسبت مکش اجکتور را تا ۱۲ درصد در مقایسه با نازل مرجع با مقطع دایرهای دارند.

برای اعتبارسنجی آزمایشات تجربی، شبیهسازیهای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) نیز انجام شد. نتایچ این پژوهش میتواند مقدمهای بر استفاده از راهحلهای نوآورانه در بهبود عملکرد اجکتورهای فراصوت با استفاده از هندسههای جدید برای نازل اولیه باشد. **واژههای کلیدی:** اجکتور، فراصوت، راندمان، نازل، دوفاز، نسبت مکش.

An experimental study on the performance of non-circular nozzles for two-phase steam and air ejectors

S. Akbarnejad M. Ziabasharhagh Department. Of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran Department. Of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

This paper introduces a novel approach to enhance the performance of a two-phase steam and air ejector through primary supersonic nozzle designs with uncircular cross-sections. Experimental tests evaluated the impact of these novel nozzle designs which included a star shape a simple square a square skewed in the direction of the nozzle axis a special sketch and a simple circular cross-section as the reference nozzle on the ejector's performance. The results indicated that the novel nozzles demonstrated the capability to enhance the ejector's entrainment ratio by up to 12% compared to the conventional circular cross-section reference nozzle. To validate and gain further insights into the novel nozzle designs computational fluid dynamics (CFD) simulations were also conducted. The integration of CFD simulations and experimental data showcased the potential of these uncircular cross-section nozzles to improve the ejector's performance. The findings offer promising opportunities for optimizing ejector configurations -

paving the way for more efficient and innovative solutions in various engineering applications.

Keywords: ejector 'supersonic 'efficiency 'nozzle 'two-phase 'entrainment ratio.

۱– مقدمه

اجکتورهای فراصوت ابزارهای مکانیکی هستند که در آنها انرژی جنبشی سیال اولیه با فشار بالا با عبور از نازل همگرا-واگرا به سرعتهای فراصوت رسیده و فشار آن کاهش مییابد و از آنها عموماً برای اختلاط و/یا فشردهسازی مجدد دو جریان سیال استفاده میشود. در بسیاری از کاربردهای صنعتی، اجکتورهای جت بخار برای دستیابی به محیطهای خلاء یا کم فشار استفاده میشوند. این کاربردها شامل فرآیندهای شیمیایی، تولید نفت و گاز [۵] و نمکزدایی [۶ تا ۸] است. برای مثال، در برجهای تقطیر، اجکتورهای جت بخار با ایجاد خلاء نقطه فرآیندهای شیمیایی، تولید نفت و گاز [۵] و نمکزدایی [۶ تا ۸] است. جوش مایعات را کاهش داده و امکان جداسازی آسانتر ترکیبات را فراهم میکنند. در فرآوری مواد غذایی، داروسازی و تولید مواد شیمیایی، اجکتورها به حذف رطوبت در طول فرآیند خشک کردن

در مقایسه با کمپرسورهای مکانیکی، اجکتورها مزایای متعددی از قبیل عملکرد قابل اعتماد، پایداری و عدم نیاز به تعمیر و نگهداری، نداشتن قطعات متحرک و وزن کم را دارند. با این حال، اجکتورها بازده کمتری نسبت به کمپرسورهای مکانیکی دارند. بنابراین مطالعات متعددی برای بهبود کارایی اجکتورها انجام شده است. این مطالعات شامل بهینهسازی شکل و هندسه نازل اولیه و اجکتور با تکنیکهای دینامیک سیالات محاسباتی و آزمایشات تجربی [۹ تا ۱۲] و با بررسی اثرات ساختار جریان داخلی بر عملکرد اجکتور [۱۴]، و نیز بررسی تأثیر ویژگیهای موج ضربهای بر عملکرد اجکتور [۱۴ تا ۱۶] میباشد.

کمک میکنند. علاوه بر این، در تولید برق و تصفیه آب از اجکتورها برای حذف گازهای محلول در آب استفاده می شود که در این مورد مشابه این پژوهش اجکتور دو فازی بوده و سیال اولیه بخار آب و سیال ثانویه هوا و یا سایر گازهای موجود در آب می باشد.

[®] نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mzia@kntu.ac.ir تاریخ دریافت: ۲۱/۱۰/۱۷ تاریخ پذیرش: ۲/۱۲/۱۴

علیاری شوره دلی و همکاران [۱۷] تاثیر نازل اولیه جریان موازی را بر عملکرد اجکتوری که در چرخه تبرید اجکتوری مورد استفاده قرار میگیرد بررسی نمودند. در تحقیق دیگر گیلاندوست و همکاران [۱۸] به بررسی تاثیر فشار سیال مکش در عملکرد اجکتور پرداختند. صادقی و همکاران [۱۹] نیز مدل یک بعدی جدید برای تحلیل عملکرد اجکتور ارائه دادند.

در سالهای اخیر مدل بخار مرطوب در شبیهسازی CFD توسط چندین محقق استفاده شده است [۲۰ تا ۲۳]. این مدل پدیده تراکم غیر تعادلی را در داخل اجکتورهای جت بخار در نظر میگیرد.

در تحقیقات گذشته توجه اندکی به توسعه طرحهای نوآورانه برای اجکتورها و نازلها شده است. چانگ و همکاران [۲۴] استفاده از یک نازل گلبرگی⁽ را به عنوان جایگزینی برای نازل مخروطی معمولی به منظور افزایش عملکرد سیستم تبرید جت بخار پیشنهاد کردند. در مطالعه دیگری، ما و همکاران [۲۵] یک اجکتور بخار جدید را معرفی کردند که دارای طراحی نازل با نسبت مساحت متغیر بود که در آن جریان سیال اولیه اجکتور توسط یک مخروط در محور نازل اولیه تنظیم میشد که میتوان آن را به سمت گلوگاه نازل اولیه حرکت داد را کاهش دهد. این طرح قادر به تنظیم عملکرد اجکتور در پاسخ به تغییرات کوچک در شرایط عملیاتی است.

آیسا [۲۶] نشان داد که استفاده از چندین نازل، به جای یک نازل، میتواند نسبت مکش و کارایی اجکتور را بهبود بخشد. علاوه بر این، نتایج تجربی او نشان داد که ایجاد چرخش در جریان میتواند باعث افزایش بیشتر نسبت مکش شود. از طریق تکنیکهای آشکارسازی جریان، او به این نتیجه رسید که استفاده از چند نازل و ایجاد چرخش در جریان اولیه میتوان طول اختلاط مورد نیاز را کاهش داد.

تا کنون تحقیقات محدودی بر روی شکل نازل اولیه انجام شده است. در یک پژوهش، ژو و همکاران [۲۷] یک جفت نازل نوآورانه به نام نازل گلبرگی و کنگره ای ^۲ معرفی نمودند. آنها از یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی سه بعدی (CFD) برای ارزیابی تأثیر این نازلها بر عملکرد اجکتور استفاده کردند. نتایج نشان داد که نازل گلبرگی باعث ایجاد نسبت مکش کمی پایین تر در مقایسه با اجکتور مجهز به نازل مخروطی می شود. علاوه بر این، هنگام استفاده از نازل گلبرگی، فشار برگشت بحرانی ۵/۲ ٪ افزایش یافت. از سوی دیگر، استفاده از نازل کنگره ای نسبت مکش کمی بالاتر و کاهش فشار بحرانی به میزان ۲/۱٪ را نشان داد.

در تحقیق دیگری که توسط جادش و رائو [۲۸] انجام شد، آنها دو نازل فراصوت را آزمایش کردند: نازل فراصوتTip Ring و نازل لبهدار با نوک تیز بیضوی (ESTS). این نازلها برای بهبود اختلاط در اجکتورهای فراصوت طراحی شدهاند. این مطالعه نشان داد که استفاده از این نازلهای جدید منجر به افزایش قابل توجه ۳۰ درصدی در مکش جریان ثانویه در اجکتورهای فراصوت شد. با این حال، نازل لوبدار ESTS کاهش نسبت تراکم ۱۵٪ را ایجاد کرد، در حالی که نازل

نوک حلقهای باعث کاهش قابل توجهی در نسبت تراکم به میزان ۵۰٪ شد.

تحقیقات انجام شده توسط ژو و همکاران [۲۷] و جادش و رائو [۲۸] تغییرات شکل نازل اولیه اساساً روی بخش خروجی نازل اولیه متمرکز بودند و کل طول نازل را شامل نمیشد. هدف این مطالعه بررسی تجربی عملکرد یک اجکتور با استفاده از سطح مقطعهای جدید برای نازل اولیه است.

۲- نحوه کار اجکتور

یک طرحواره از اجکتور جت بخار در شکل نشان داده شده است.



شکل ۱- طرحواره اجکتور جت بخار و تغییرات فشار در طول آن

بخار محرک^⁴ با فشار بالا در حالت ۱، بعد از عبور از نازل اولیه منبسط شده و فشارش به فشار نقطه ۰ که برابر با فشار بخار مکش فرض می شود کاهش می یابد. در محفظه اختلاط بخار اولیه و مکش مخلوط شده و در نقطه ۳۵ با سرعت بسیار بالایی (معمولاً فراصوت) وارد مقطع سطح ثابت اجکتور می شوند. به دنبال شوک ضربه ای قائم در نقطه ای مانند ۳۵ فشار مخلوط سیال اولیه و مکش افزایش و سرعت آن به کمتر از سرعت صوت کاهش می یابد. جریان سیال مخلوط در دیفیوزر به فشار چگالنده در نقطه ۴ فشرده می شود.

در اجکتورها، نسبت مکش و نسبت فشار پارامترهای مهمی هستند که میتوانند بر عملکرد و کارایی سیستم تأثیر بگذارند. نسبت مکش به صورت دبی جریان سیال مکش شده (سیال ثانویه) تقسیم بر دبی جرمی سیال اولیه تعریف میشود.

¹ Petal nozzle

² crenetion

³ Elliptic Sharp Tipped Shallow

⁴ Motive steam

كامل – سعيد اكبرنژاد و مسعود ضياء بشرحق

شریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره پیاپی ۵۰۱، جلد ۵۳. شماره ۴. زمستان، ۲۰۴۲، صفحه

 $Er = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_n}$ (1) نسبت تراکم به صورت فشار سیال مخلوط (سیال اولیه و سیال مکش شده) در خروجی اجکتور تقسیم بر فشار سیال ثانویه در ورودی

$$=p_4/p_0\tag{(1)}$$

Ns

نسبت مکش بالا نشان میدهد که مقدار بیشتری از سیال ثانویه با سیال اولیه مخلوط می شود، که می تواند با افزایش دبی جرمی جریان مکش به ازای دبی جرمی سیال اولیه ثابت، کارایی اجکتور را بهبود بخشد. نسبت فشار نیز مهم است زیرا افزایش فشار ایجاد شده توسط اجکتور را نشان میدهد. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر هندسههای مختلف نازل اولیه بر این دو پارامتر با انجام آزمایشهای تجربی است.

۳- شرایط مرزی

مكش اجكتور تعريف مىشود.

سیال کاری برای نازل اولیه بخار آب و برای جریان ثانویه هوا است. بخار اشباع توسط دیگ بخار تولید شده است.



شکل ۱- راه اندازی اجکتور: (۱) بخار زنده از دیگ بخار.(۲) گیج فشار و دمای بخار اولیه؛ (۳) بدنه اجکتور؛ (۴) چگالنده هوا خنک. (۵) فشار سنج چگالنده؛ (۶) گیج فشار مکش؛ (۷) منیفولد تنظیم نرخ جریان جرمی مکش

منیفولد مکش بکار گرفته شده در این مطالعه را برای تنظیم دبی جرمی جریان نشان میدهد. این منیفولد امکان محاسبه دبی جرمی عبوری از یک روزنه با اختلاف فشار مشخص را فراهم میکند. کاربرد این منیفولد به این شکل است که بهجای اندازه گیری مستقیم دبی جریان هوا در ورودی مکش با استفاده از دبی سنج، دبی جرمی هوا با تغییر نازلها با قطرهای مختلف محاسبه می شود. این رویکرد به این دلیل انتخاب شد که جرم هوای عبوری از این نازلها در یک فشار مکش معین ثابت است.

با تغییر فشار برگشتی و ثابت نگه داشتن نسبت مکش، میتوان منحنی عملکرد اجکتور را استخراج کرد. با این که میتوان از معادلات ساده برای تخمین دبی جرمی هوا با دقت قابل قبول استفاده کرد، تمرکز این مطالعه بر مقادیر دقیق دبی جرمی نیست، بلکه بر روی حداکثر نسبت مکش برای هر نازل در مقایسه با نازل مرجع مخروطی (سطح مقطع دایره ای) است.



شکل ۲- منیفولد تنظیم نرخ جریان جرم مکش

۴- ابعاد اجکتور و فرآیند ساخت

ابعاد اجکتور مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۳ و جدول ۱ نشان داده شده است. ابعاد اجکتور بر اساس توصیههای ذکر شده در ESDU [۲۹] برای شرایط مرزی مورد نظر محاسبه گردید.



شکل ۳- هندسه و ابعاد اجکتور

جدول ۱–ابعاد اجكتور

| mm | ٣ | قطر گلوگاه | نازل |
|------|------|--------------------------------|--------|
| mm | ٩ | قطر ورودى | |
| mm | ۴/۵ | قطر خروجى | |
| mm | 18 | طول قسمت واگرا | |
| درجه | ۶/٨ | زاويه قسمت واگرا | |
| درجه | ۶/٨ | زاويه قسمت همگراي محفظه اختلاط | اجكتور |
| درجه | ۶/٨ | زاويه ديفيوزر | |
| mm | ۸/٣ | طول قسمت سطح ثابت اجكتور | |
| mm | ۲۵/۳ | طول قسمت همگرای اجکتور | |
| mm | ۲۵/۳ | طول ديفيوزر | |
| mm | • | NPX (net positive x position) | |

ساخت نازلها به دلیل هندسه پیچیده و اندازه کوچک آنها یک چالش مهم بود. پرینت سه بعدی یا ساخت افزایشی ٔ یکی از بهترین روشها برای تولید اجسام با هندسه پیچیده است. با این حال این روش

¹ additive manufacturing

محدودیتها و معایب خاصی نیز دارد، از جمله این محدودیتها امکان استفاده از مواد محدود و با دمای انتقال شیشهای پایین و استحکام مکانیکی پایین است. در این پژوهش، ما از یک چاپگر سه بعدی FDM استفاده کردیم و از ماده پلی کربنات که دمای انتقال شیشهای ۱۵۰ درجه سلسیوس دارد و برای محدوده دمایی آزمایشات ما مناسب است استفاده شد. فیلامنت پلی کربنات به دلیل مقاومت در برابر دمای بالا و استحکام مکانیکی بالا نسبت به سایر مواد FDM انتخاب گردید. با این وجود، چاپ آن به دلیل دمای اکستروژن بالا و حساسیت به انقباض و مشکلات تاب خوردگی، که محدودیتهایی را بر ارتفاع لایه و قطر نازل تحمیل می کند، چالش برانگیز است. در شکل ۴ تصویر سه نوع نازل اولیه غیر مخروطی با مقطع مربعی، مقطع ستاره و مقطع مربعی پیچ خورده در امتداد محور نازل نشان داده شده است. در شکل ۵ نیز دو نوع دیگر نازل یعنی نازل مخروطی معمولی و یک نازل با سطح مقطع خاص در کنار هم نشان داده شده اند. در همه نازل ها قطر گلوگاه نازل ثابت و دایره ای و همان گونه که توضیح داده شد با یک مته به قطر ۳ میلیمتر ایجاد شده است و طول قسمت واگرای نازل اولیه و مساحت سطح خروجی نازل در همه نمونه ها یکسان است. جزییات و ابعاد دقیق نازل مخروطی معمولی در شکل ۶ و برای نازل با سطح مقطع مربعی در شکل ۷ و برای نازل با مقطع مربعی پیچیده شده در امتداد محور نازل در شکل ۸ آورده شده است. شکل ۹ نقشه و ابعاد نازل اولیه با مقطع با طراحی خاص و شکل ۱۰ نقشه و ابعاد نازل اولیه با مقطع ستاره ای را نشان می دهد.

بدنه اجکتور از آلومینیوم با استفاده از فرآیند تراشکاری ساخته شد که منجر به دقت و زبری سطح قابل قبولی شد. علیرغم اینکه سطح نازلهای ساخته شده به روش پرینت سه بعدی زبری بالایی دارند، از آنجایی که ارتفاع لایهها و زبری سطح همه نازلها یکنواخت است، این موضوع اهمیت زیادی ندارد زیرا هدف ما ارزیابی تأثیر هندسه نازلهای مختلف بر عملکرد اجکتور است و شرایط زبری سطح برای همه آنها مشابه است.



شکل ۴-تصویر نازلهای اولیه: الف: مقطع مربع، ب: مقطع ستاره، ج: مقطع مربعی پیچ خورده در امتداد محور نازل



شکل ۵− تصویر نازلهای اولیه: D: نازل اولیه با مقطع طرحی خاص، E: مقطع دایرهای ساده



شکل ۶- نقشه و ابعاد نازل اولیه دایرهای ساده



SECTION A A SCALE 5 : 1

شكل ٧- نقشه و ابعاد نازل اوليه با سطح مقطع مربع



شکل ۸- نقشه و ابعاد نازل اولیه با مقطع مربعی پیچ خورده در امتداد محور نازل

¹ Fused Deposition Molding



شکل ۹- نقشه و ابعاد نازل اولیه با مقطع با طراحی خاص



۵- نتایج تجربی

مطالعه حاضر با هدف ارزیابی کیفی تأثیر هندسههای مختلف نازل بر نسبت مکش و نسبت تراکم یک اجکتور انجام شد. تمرکز بر روی تعیین مقادیر دقیق برای نرخ جریان جرمی و نسبتهای مکش سیال اولیه و ثانویه نیست، بلکه بیشتر برای به دست آوردن درکی از تأثیر شکلهای مختلف نازل بر نسبت مکش و نسبت تراکم یک اجکتور است. نرخ جریان جرمی هوای عبوری از نازل را میتوان بر اساس اختلاف فشار در ورودی و خروجی یک روزنه و خواص ترمودینامیکی سیال محاسبه کرد. در حالی که تفاوت فشار و خواص سیال ثابت است، قطر روزنه تنها پارامتری است که بر سرعت جریان جرمی تأثیر میگذارد. از آنجایی که دبی جرمی با مساحت مقطع اوریفیس نسبت مستقیم خطی دارد، افزایش مساحت مقطع اوریفیس در ورودی مکش با یک ضریب X، در حالی که فشار و دما ثابت است، دبی جرمی جریان

در آزمایشها، نازل اولیه در حالت خفگی است و دبی جرمی بخار عبوری از نازل همگرا-واگرا، تنها با سطح مقطع گلوگاه نازل و فشار بخار زنده قبل از ورود به نازل مرتبط است. برای اطمینان از یکسان بودن دبی جریان اولیه بخار آب از همه نازلها، قطر گلوگاه برای همه نازلها یکسان در نظر گرفته شد. به دلیل محدودیتهای رشته پلی کربنات مورد استفاده برای چاپ سه بعدی، استفاده از نازلهای پرینتر سه بعدی با قطر کمتر از ۲/۰ میلی متر امکان پذیر نبود. در نتیجه، خطای تا ۱۳٪ در قطر ممکن است وجود داشته باشد. برای جلوگیری از این خطا، تمام نازلها با یک مته ۳ میلی متری سوراخ شدهاند تا از یکسان بودن قطر و دبی جرمی برای همه نازلها اطمینان حاصل گردد.

اندازه گیری فشار و دمای بخار زنده در ورودی نازل اولیه با استفاده از گیچ ترکیبی فشار و دمای کالیبره شده (شماره ۲ در شکل ۱ با دقت ۲/۵ ٪ انجام میشود. در حالی که دقت این فشار سنج چندان بالا نیست، این موضوع تأثیر قابل توجهی بر کار ما ندارد زیرا آزمایشها با هوای مکش در اجکتور نیز با استفاده از فشار سنج با همان دقت اندازه گیری میشود. هدف دستیابی به یک دبی ثابت برای همه نازلها به جای تعیین مقادیر دقیق فشار و دبی جرمی است. منیفولد تنظیم دهانههای مختلف با تلرانس کمتر از ۲۰/۰ ± میلی متر است. مکش اجکتور با استفاده از فرار ب علی متر است. نسبت دهانههای مختلف با تلرانس کمتر از ۲۰/۰ ± میلی متر است. نسبت نازلها در منیفولد مکش با نازل اولیه جدید با مقایسه مجموع مساحت نازلها در منیفولد مکش با نازل اولیه دایرهای مرجع محاسبه میشود.

فرض بر این است که دبی جرمی بخار اولیه در همه نازلها برابر است زیرا قطر گلوگاه در همه نازلهای اولیه یکسان است و همه نازلها با یک مته با دقت بالا سوراخ شدهاند. بنابراین، نسبت مجموع مساحت نازلها در منیفولد مکش برای هر نازل اولیه به مجموع مساحت نازلها در منیفولد مکش با نازل اولیه دایرهای مرجع را میتوان به عنوان نسبت مکش اجکتور دانست. این نسبت را در این مطالعه با عدد φ مشخص کردیم.

از آنجایی که نازلها در منیفولد ورودی مکش با دقت بالایی تولید میشوند، به جای اندازه گیری مستقیم دبی جرمی، مجموع مساحت نازلها را در منيفولد مكش اندازه گيرى كرديم. البته توجه به اين نكته ضروری است که دبی عبوری از یک اوریفیس علاوه بر خواص سیال عبوری و اختلاف فشار، تابعی از ضریب تخلیه است نیز میباشد. از آنجایی که همه این نازلهای استفاده شده در منیفولد ورودی مکش شکل یکسانی دارند و عملا یک سوراخ با قطر دقیق هستند انتظار داریم ضریب تخلیه نیز در این نازلها یکسان باشد. هر چند این احتمال وجود دارد که نسبت مکش دقیقا به طور خطی با افزایش قطر نازلها تغییر نکند و خطایی در این این ارتباط وجود داشته باشد. لازم به ذکر است ما به دلیل محدودیتها در تهیه دبی سنج با دقت کافی در بازه دبی پایین طراحی مجبور به طراحی سیستم اندازه گیری دبی با این سیستم شدیم اما به هر حال حتی در صورت وجود خطا به دلیل تفاوت در ضریب تخلیه و خطی نبودن رابطه مجموع مساحت با دبی عبوری، همچنان عدد 🖗 یعنی نسبت مجموع مساحت نازلها را در منیفولد مکش با یک خطای احتمالی میتواند معیار خوبی برای مقایسه نسبت مکش اجکتور با نازلهای مختلف باشد و هدف این تحقیق بیشتر ارزیابی کیفی و دستیابی به شکل مقطع بهینه است و به دلیل محدودیتهای اندازه گیری و آزمایش، هر چند این روش ممکن است به لحاظ كمى كاملا دقيق نباشد ولى بلحاظ كيفي امكان مقايسه نازل با شکلهای مختلف را میدهد.

با تنظیم اندازه نازلها در منیفولد مکش برای هر نازل اولیه، با فشار ثابت ۴ بار در ورودی نازل اولیه ، فشار مکش روی عدد ۷۰ کیلو پاسکال مطلق حفظ شد. نتایج فشارهای پشتی بحرانی و عدد مقاطع مختلف نازل در جدول ۲ فهرست شده است.

جدول ۲- فشارهای برگشتی بحرانی و مقادیر برای نازلها با

| طع مختلف | مقار |
|----------|------|
|----------|------|

| | | C C |
|------|--------------|-----------------------------|
| Φ | $P_{c}(kPa)$ | مقطع نازل اوليه سطح |
| 1/17 | ۱۰۵ | طرح خاص |
| ۱/۰۸ | ١٠٢ | ستاره ای |
| 1/1 | ١٠۵ | اجکتور مربعی تابیده در محور |
| •/94 | 1.4 | مربعی سادہ |
| ١ | 17. | دايره اي |

فشار پشتی بحرانی برای اجکتورهای مجهز به نازلهای جدید کمتر از اجکتور با استفاده از یک نازل اولیه دایرهای است، که نشان دهنده تلفات احتمالی ناشی از چرخشها یا گردابهای ناشی از طرحهای جدید نازل یا افزایش اصطکاک ناشی از متقاطع غیر دایرهای است. اما مقادیر ϕ که نشان دهنده نسبت مکش اجکتور است در اجکتور با نازلهای جدید طرح خاص سطح مقطع، ستارهای و مربعی پیچیده شده در راستای محور نازل بالاتر از ۱ است که به معنی بیشتر بودن نسبت مکش در مقایسه با نسبت مکش اجکتور با نازل دایرهای است اما عدد ϕ برای نازل با سطح مقطع مربعی بدون پیچش در راستای محور نازل علاوه بر این که باعث کاهش فشار پشتی بحرانی شد، موجب کاهش نسبت مکش نیز گردید (عدد ϕ برابر با ۹۴/۰).

نسبت مکش و فشار پشتی بحرانی پایین ر اجکتور با سطح مقطع مربع ساده را می توان به تلفات مر تبط با گردابه های ایجاد شده توسط لبه های تیز بر روی مقطع مربع و عدم وجود چرخش ناشی از پیچش در راستای محور نسبت داد که این پیچش منجر به اختلاط بهتر می شود.

ما حدس میزنیم که نسبت مکش بالاتر برای سایر طرحهای نازل به دلیل اختلاط بهتر با جریان ثانویه است، که نیاز به تجزیه و تحلیل بیشتر با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و تکنیکهای آشکارسازی جریان در مطالعات آینده دارد.

۶− تجزیه و تحلیل CFD و اعتبار سنجی تجربی

۶–۱– مقدمه

برای تأیید نتایج تجربی خود، شبیهسازیهای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) را به طور خاص با تمرکز بر طراحی نازل دایرهای انجام دادیم. برخلاف دیگر پیکربندیهای نازل جدید، که به دلیل هندسههای پیچیدهشان به شبیهسازیهای سهبعدی نیاز دارند، نازل دایرهای معمولی را میتوان با استفاده از یک مدل متقارن محوری دوبعدی شبیهسازی کرد. از نازل دایرهای به عنوان مرجعی برای مقایسه نتایج CFD با دادههای تجربی خود در طول فرآیند اعتبار سنجی استفاده کردیم. این تجزیه و تحلیل مقایسهای ما را قادر میسازد تا دقت و قابلیت اطمینان نتایج تجربی را ارزیابی کنیم.

در آزمایشیهای انجام شده، هدف اصلی ما مقایسه نسبت مکش و فشار برگشت بحرانی اجکتور با استفاده از شکلهای مختلف نازل بود. برای ارزیابی نسبتهای مکش، مجموع نواحی نازلها در منیفولد مکش را برای هر نازل اولیه اندازه گیری کردیم و آن را با نازل اولیه دایرهای مرجع مقایسه کردیم و اندازه گیری مستقیم دبی جرمی هوا در طول آزمایشها انجام نشد، که چالشی را در مقایسه مستقیم نسبتهای

مکش بهدستآمده از شبیهسازیهای CFD با نتایج تجربی ایجاد میکند.

برای کاهش پیچیدگیهای مرتبط با مدلسازی یک اجکتور دو فازی و اندازه گیری دقیق دبی جرمی مکش، تصمیم گرفتیم از یک مدل اجکتور خلاء با جریان ثانویه صفر استفاده کنیم. این مدل به طور خاص برای ایجاد خلاء بدون اختلاط سیال ثانویه طراحی شده است. با مسدود کردن ورودی مکش، فشار مکش را در فشارهای مختلف بخار اولیه اندازه گیری کردیم در حالی که فشار پشتی ثابت را در خروجی اجکتور حفظ کردیم. با استفاده از این رویکرد که در آن تنها بخار آب به عنوان سیال کاری استفاده میشود، نیاز به اندازه گیری دقیق دبی جرمی مکش نخواهد بود و تنها فشار در ورودی مکش اندازه گیری میشود.

CFD شرایط مرزی و تنظیمات

برای بررسی عملکرد اجکتور با استفاده از طراحی نازل دایرهای، تراکههای مش مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند. در نهایت، مش متشکل از تقریباً ۲۰۰٬۹۲۰ سلول چهار ضلعی انتخاب شد. در این تراکم مش حل را میتوان مستقل از تراکم مش در نظر گرفت زیرا با افزایش بیشتر تراکم مش، فشار مکش که تمرکز اصلی این شبیه سازیهای CFD بود، به طور قابل توجهی تغییر نکرد. برای این پژوهش این شرط برای نتیجه گیری مستقل بودن حل از مش کفایت میکند هرچند، برای تجزیه و تحلیل دقیقتر، مانند مشاهده همه امواج ضربه ای و مطالعه رفتار جریان در داخل اجکتور، تراکم مش بالاتر ممکن است لازم باشد.

شرایط مرزی برای شبیه سازی های CFD به شرح زیر تنظیم شد: شرایط مرزی بخار اولیه به عنوان "ورودی فشار" تعریف شد، در حالی که شرایط مرزی بخار تخلیه به عنوان یک خروجی فشار در فشار اتمسفر (۱۰۱۳۲۵ پاسکال) برای همه اجراها تنظیم شد. از آنجایی که در طول این شبیه سازی ها جریانی در ورودی مکش وجود نداشت، ورودی مکش به عنوان دیوار تعریف شد و میانگین فشار در این ورودی، در فشارهای بخار اولیه مختلف محاسبه شد.

۶-۳- معادلات حاکم

برای شبیه سازی CFD، ما از بسته تجاری ANSYS FLUENT . 19.2 برای حل معادلات ناویر استوکس استفاده کردیم. معادلات حاکم بر پیوستگی، مومنتوم و انرژی در قالب مجموعهای از معادلات دیفرانسیل پارهای (PDE) حل شد.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{v} = \cdot \tag{(f)}$$

$$\rho \frac{D\boldsymbol{v}}{Dt} = \rho \boldsymbol{g} - \nabla p + \nabla \tau_{ij} \tag{f}$$

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \operatorname{div}(k\nabla T) + \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$$
(Δ)

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \mathbf{I} \operatorname{div} \mathbf{v} \right)$$
(?)

اگرچه جریان داخل اجکتور ذاتا ویژگیهای سه بعدی را نشان

می دهد، سرعت نسبتاً کم بخار اولیه و مکش در ورودی اجکتور در مقایسه با بخار داخل اجکتور، امکان استفاده از یک مدل متقارن محوری دوبعدی را فراهم می کند. مطالعات قبلی نشان دادهاند که مدل متقارن محوری دوبعدی نتایجی به دست می دهد که با دادههای تجربی همسو هستند و در برخی موارد، پیش بینیهای دقیق تری نسبت به مدل سه بعدی ارائه می دهند. در مطالعه وار گا و همکاران[۳۰] مشخص شده است که فشار استاتیک در طول اجکتور در هر دو مدل متقارن محوری و سه بعدی بسیار نزدیک است.

در ارتباط با مدلسازی آشفتگی، مدلهای مختلف آشفتگی در مطالعهای توسط وارگا و همکاران [۳۰] مورد ارزیابی قرار گرفتند. ، از جمله Factor استاندارد، K-G استاندارد ، K-G استاندارد ، SST جمله k-۵ استاندارد، Transition SST دقیق ترین (cOP) و مدلهای ضریب عملکرد (COP) و فشار برگشت بحرانی را با میانگین خطاهای نسبی به ترتیب ۴٪ و ۲۰/۸٪ نشان داد. در مقابل، مدل استاندارد ۵-۵ ضعیف ترین عملکرد را نشان داد. برای این مطالعه، مدل SST مدل استاندارد مدل آشفتگی استفاده شد، زیرا دقیق تر از مدل های دیگر (به استثنای مدل آشفتگی استفاده شد، زیرا دقیق م دان محاسباتی بسیار کمتری نسبت به مدل Transition SST دارد.

بخار آب به عنوان سیال کاری انتخاب شد و چگالی سیال بر اساس قوانین گاز ایده آل محاسبه شد. در شبیهسازیها از یک حلکننده مبتنی بر فشار جفتشده و روش بالادست مرتبه دوم برای گسستهسازی استفاده شد. معیارهای همگرایی به این نحو تعریف شد که همه باقیماندهها به مقدار کمتر از ^{۶–} ۱ × ۱ رسیده و در عین حال مقدار نسبت مکش به ثبات برسد و با محاسبات بیشتر تغییر نکند.

۷− نتایج CFD

شکل ۱۱ کانتور عدد ماخ جریان درون اجکتور را با نازل دایرهای معمولی در فشار بخار اولیه ۳۰۰ کیلو پاسکال (مطلق) نشان می دهد، در حالی که شکل ۱۲ کانتورهای عدد ماخ را در فشار بخار اولیه ۵۰۰ کیلو پاسکال (مطلق) نشان می دهد. نکته قابل توجه کانتور عدد ماخ جریان درون اجکتور شکل ۱۱ این است که به دلیل اینکه فشار بخار اولیه ۳۰۰ کیلو پاسکال، کمتر از فشار اولیه طراحی شده برای این اولیه ۳۰۰ کیلو پاسکال، کمتر از فشار اولیه طراحی شده برای این نیزل به انبساط خود ادامه دهد و در میانه مسیر دچار شوک قائم شده و فشار آن افزایش و سرعت آن کاهش می یابد. این حالت کار کرد که نازل جارج از طراحی نازل اولیه است انبساط ناقص^۱ است که در مقابل انبساط بیش از حد^۲ قرار دارد که در آن جت پر سرعت جریان بخار بعد از خروج از نازل اولیه همچنان به انبساط بیشتر ادامه می دهد.

شکل ۱۳ فشار استاتیک در طول محور اجکتور در فشار بخار ۳۰۰ کیلو پاسکال را نشان میدهد. این نوسانات شدید در فشار استاتیک در طول محور اجکتور به دلیل سرعت بالای جریان در هسته فرا صوت است که طی عبور از محفظه اختلاط دچار شوکهای قائم و مایل زیادی میشود و بر همکنش این امواج پیدهای به نام قطار شوک را به

وجود میآورد که این پدیده هم در خطوط هم تراز عدد ماخ شکل ۱۱ و شکل ۱۲ و هم در منحنی فشار استاتیک در طول محور اجکتور در شکل ۱۳ قابل مشاهده است.

شکل ۱۱- کانتور عدد ماخ جریان درون اجکتور با نازل دایرهای معمولی در فشار بخار اولیه ۳۰۰ کیلو پاسکال

Mach numbers

Mach numbers

شکل ۱۲ -کانتور عدد ماخ جریان درون اجکتور با نازل دایرهای معمولی در فشار بخار اولیه ۵۰۰ کیلو پاسکال





برای تأیید بیشتر عملکرد پیکربندیهای نازل جدید تحت یک شرایط عملیاتی خاص، آزمایشهای تجربی بیشتری را برای نازلهای جدید با استفاده از تنظیم جریان ثانویه صفر انجام دادیم.

نتایچ حاصل از آزمایشها و شبیهسازیهای CFD نشان داد که پیکربندیهای جدید نازل میتوانند در مقایسه با نازل دایرهای معمولی تحت شرایط جریان ثانویه صفر، خلاء کمتری ایجاد کنند. این یافته با مشاهدات قبلی ما مطابقت داشت، که درآن نازلهای جدید در هنگام ثابت شدن فشار اولیه و مکش، نسبتهای مکش بالاتر و فشارهای برگشت بحرانی کمتری را نشان دادند. شکل ۱۴ – مقایسه فشار مکش بین نتایچ CFD و نتایچ تجربی برای نازل مخروطی را در فشارهای بخار

¹ Under expansion

² Over expansion

اولیه مختلف تحت شرایط مکش صفر نشان میدهد. همان طور که در این شکل مشخص است مقدار قدر مطلق خطا بین نتایج عددی و تجربی بین ۴/۸ تا ۱۸/۴ متغیر است. بیشترین خطا با مقدار ۱۸/۴ درصد مربوط به فشار بخار ۱ بار است که البته این خطای نسبتا زیاد دو دلیل دارد. اول اینکه این مقدار فشار بخار اولیه کم خارج از طراحی اجکتور بخار است و جریان امکان انبساط در نازل اولیه را پیدا نمی کند و ثانيا مقدار خلا ايجاد شده در فشار بخار اوليه كم است و اين خلاً به روش تجربی ۷ کیلو پاسکال و به روش عددی ۸/۲ کیلو پاسکال اندازه گیری شد. علیرغم اختلاف ۱۸/۴ درصدی بین این دو عدد با توجه به اینکه دقت اندازه گیری گیچ خلا ۲ کیلو پاسکال میباشد، این خطا عملاً مى تواند مربوط به دقت اندازه گيرى باشد.



شكل ۱۴- نتايج CFD و نتايج تجربي براي نازل مخروطي

شکل ۱۵ نتایج تجربی برای نازل مخروطی و سایر نازلها با طرحهای جدید را در فشارهای مختلف بخار محرک و دبی مکش صفر نشان مىدهد. اين نتايج نشان مىدهد وقتى جريان مكش ثانويه صفر است و عملا اختلاط دو سیال و نسبت مکش اهمیت ندارد و تنها خلاء ايجاد شده در قسمت مكش مهم است، نازل مخروطی بدليل تلفات کمتر عملکرد بهتری نسبت به نازل با طرحهای جدید دارد.



شکل ۱۵- نتایج CFD و نتایج تجربی برای نازل دایرهای و طرحهای جدید نازل در فشارهای بخار اولیه مختلف

همچنین برای تحقیقات آینده، استفاده از فناوریهای پرینت سه بعدی پیشرفتهتر، مانند استریولیتوگرافی (SLA) پیشنهاد میگردد که با کمک آن می توان نازلهای دقیق تر و با زبری سطح کمتری ساخت. علاوه بر این، استفاده از بدنههای اجکتور شفاف و استفاده از تکنیکهای آشکارسازی جریان، مانند تصویربرداری شلرین در تحقیقات آینده میتواند درک بهتری را در مورد فرآیند اختلاط در داخل اجکتور با استفاده از این نازلهای جدید ارائه دهد. این تکنیکهای آشکارسازی جریان میتواند به درک عمیقتر از رفتار جریان منجر شود و به بهینهسازی طرحهای نازل برای بهبود عملکرد کلی کمک کند. همچنین برای تحقیقات آینده توصیه می شود که مطالعات آینده شامل شبیهسازی دینامیک سیالات محاسباتی سه بعدی (CFD) برای طراحی های جدید نازل باشد.

۸- نتیجهگیری

یافتههای تجربی این مطالعه مزایای بالقوه استفاده از طرحهای نازل جدید در اجکتورهای بخار و هوای دو فاز را نشان میدهد. نازلهای جدید توانایی افزایش نسبت مکش اجکتور را تا ۱۲ درصد نشان داد با این حال، توجه به این نکته ضروری است که این بهبودها در نسبت مکش با تاثیر منفی بر روی فشار پشتی اجکتور همراه است. بنابراین ضروری است در طراحی اجکتور هر دو فاکتور نسبت مکش و نسبت فشار در کنار هم مقایسه شوند. با توجه به اینکه نسبت مکش بیشتر در یک طرح به معنی مصرف بخار زنده کمتر و انرژی کمتر است اگر با استفاده از نازلهای جدید، این افزایش نسبت مکش منجر به کاهش در نسبت فشار تا حدی شود که هنوز در بازه طراحی سیستم است، این امر یک مزیت و بهینهسازی محسوب خواهد شد.

۹- نمادها

| مخففها | |
|-------------|---------------------------------|
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| ESDU | Engineering Sciences Data Unit |
| ESTS | Elliptic Sharp Tipped Shallow |
| FDM | fused deposition modeling |
| SLA | Stereolithography |
| ER | نسبت مکش |
| نمادها | |
| ṁ | دبی جرمی (کیلوگرم بر ثانیه) |
| Ns | نسبت فشار ثانويه يا نسبت تراكم |
| NPX | موقعيت خروچي نازل اوليه |
| р | فشار (Pa) |
| Т | دما (K) |
| v | سرعت (m/s) |
| حروف يونانى | |
| ϕ | عملكرد ويژه |
| 0 | چگالی <i>kg</i> m ⁻³ |

لزجت دینامیکی (Pa.s) μ تنش برشی (Pa)

τ

علیاری شورہ دلی ش، مبینی ک، عساکرہ ع، بررسی عددی اثر [17] نازل اولیه جریان موازی بر عملکرد اجکتور مافوق صوت یک چرخه تبرید اجکتوری. مجلهٔ مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۳۹۹، د. ۵۰، ش. ۴، ص .747-779

گیلاندوست پ، بیاتی م، سخاوت س. بررسی تأثیر فشار ورودی [17]

ثانویه بر عملکرد یک اجکتور. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه. ۱۴۰۰، د. ۵۱، ش ۲، ص ۱۸۷–۱۹۶

[19]

صادقی م، سیدمحمودی م، خوشبختی سرای ر. ارائه مدل یک بعدی جدید برای تحلیل عملکرد اجکتور. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه

تبریز. ۱۳۹۵، د. ۴۶، ش ۲، ص ۶۱–۷۱

Al-Manea A (Saleh K. SUPERSONIC STEAM [20] EJECTORS: COMPARISON of DRY and WET-STEAM CFD SIMULATION MODELS. Journal of Engineering Science and Technology. 2022 Apr: 17(2):1200-1212.

Rad MP Lakzian E Grönman A. Numerical [21] investigation of roughness effect on wet steam ejector performance in the refrigeration cycle. Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung 2022 Sept 58(152):1545-1560.

Foroozesh F 'Khoshnevis AB 'Lakzian E. [22]

Improvement of the wet steam ejector performance in a refrigeration cycle via changing the ejector geometry by a novel EEC (Entropy generation 'Entrainment ratio 'and Coefficient of performance) method. International Journal of Refrigeration 2020 Feb: 110:248-261.

Ding H 'Zhao Y 'Wen C 'Wang C 'Sun C. Energy [23] efficiency and exergy destruction of supersonic steam ejector based on nonequilibrium condensation model. Appl Therm Eng 2021 May: 189.

Chang YJ (Chen YM. Enhancement of a steam-jet [24] refrigerator using a novel application of the petal nozzle. Exp Therm Fluid Sci .2000 Sep : 22(3-4):203-211.

Ma X 'Zhang W 'Omer SA 'Riffat SB. Experimental [25] investigation of a novel steam ejector refrigerator suitable for solar energy applications. Appl Therm Eng. 2010 Aug: 30(11-12): 1320-5.

Aissa WA. PERFORMANCE ANALYSIS OF [26]

CYLINDRICAL TYPE AIR EJECTOR. JES Journal of

Engineering Sciences. 2006 May: 34(3):733-745.

Xue K (Li K (Chen W (Chong D (Yan J. Numerical [27] Investigation on the Performance of Different Primary Nozzle Structures in the Supersonic Ejector. Energy Proced. 2017 May 5 105:4997-5004

Rao SMV Jagadeesh G. Novel supersonic nozzles for [28] mixing enhancement in supersonic ejectors. Appl Therm Eng 2014 Oct: 71(1):62-71.

ESDU item number 86030 (Ejectors and jet pumps. [29] Design. 1986.

[30] Varga S 'Soares J 'Lima R 'Oliveira AC. On the selection of a turbulence model for the simulation of steam ejectors using CFD. International Journal of Low-Carbon Technologies. 2017 Jul: 12: 233-43.

صفحه ورودي جريان ثانويه ۱ صفحه ورودي نازل اوليه ۳a صفحه ورودى بخش موازى محفظه اختلاط ۳b هواپيماي خروجي محفظه اختلاط صفحه خروجي انقباض يا ديفيوزر ۴ Р بخار اوليه يا محركه S

بخار ثانویه یا مکنده

۱۰-مراجع

Wen C 'Ding H 'Yang Y. Performance of steam [1] ejector with nonequilibrium condensation for multi-effect distillation with thermal vapour compression (MED-TVC) seawater desalination system. Desalination. 2020 Sept 489:1-8. [2] Suryanto S 'Hamzah N 'Taufik A. The novel vacuum drying using the steam ejector. Drying Technology. 2020 Feb: 39:

905-911. Zhang S 'Luo J 'Wang Q 'Chen G. Step utilization of [3] energy with ejector in a heat driven freeze drying system. Energy 2018 Dec: 164: 734-744.

Tian Q (Liu ZX (Hu JP. Numerical study on the [4] ejector structure of deaerator. 2019 IEEE 10th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE 2019 Jul: 475-81.

Chen W (Chong D (Yan J Liu J. The numerical [5] analysis of the effect of geometrical factors on natural gas ejector performance. Appl Therm Eng. 2013 Sep: 59: 21-29.

Wang K Wang L Jia L Cai W Gao R. Optimization [6] design of steam ejector primary nozzle for MED-TVC

desalination system. Desalination. 2019 Dec: 471.

Liu J Wang L Jia L Xue H. Thermodynamic [7] analysis of the steam ejector for desalination applications. Appl Therm Eng. 2019 Aug : 159.

Shahzamanian B (Varga S (Soares J (Palmero-Marrero [8] AI Oliveira AC. Performance evaluation of a variable geometry ejector applied in a multi-effect thermal vapor compression desalination system. Appl Therm Eng. 2021 Aug: 195.

[9] Ghonim T Said Farag M Hegazy A. Optimization of Steam Ejector Performance Using CFD. ERJ Engineering Research Journal. 2021 Jul: 44:273-284.

[10] Ringstad KE 'Banasiak K 'Ervik Å 'Hafner A. Machine learning and CFD for mapping and optimization of CO2

ejectors. Appl Therm Eng. 2021 Nov: 199:1-15. Li R 'Yan J Reddick C. Optimization of three key

[11] ejector geometries under fixed and varied operating conditions: A numerical study. Appl Therm Eng. 2022 Jul: 211.

Galindo J Gil A Dolz V Ponce-Mora A. Numerical [12] Optimization of an Ejector for Waste Heat Recovery Used to Cool down the Intake Air in an Internal Combustion Engine. J Therm Sci Eng Appl . 2020 Apr: 12:1-32.

[13] Falsafioon M 'Aidoun Z 'Ameur K. Numerical investigation on the effects of internal flow structure on ejector performance. Journal of Applied Fluid Mechanics. 2019 Novs 12:2003-2015

Mardikus S. Effects of Shock Wave Phenomenon on [14] Different Convergent Lengths in the Mixing Chamber of the Steam Ejector. International Journal of Applied Sciences and Smart Technologies. 2021 Jun: 03(01):93-100.

[15] Li Y 'Shen S 'Niu C 'Mu X 'Zhang L. The effect of variable motive pressures on the performance and shock waves in a supersonic steam ejector with non-equilibrium condensing. International Journal of Thermal Sciences. 2023 Mart 185.

Han Y 'Wang X 'Guo L 'Yuen ACY 'Liu H 'Cao R ' [16] et al. A steam ejector refrigeration system powered by engine combustion waste heat: Part 2. Understanding the nature of the shock wave structure. Applied Sciences (Switzerland). 2019 Octs 9(20).

زيرنويسها