

مدل‌سازی عددی و بهینه‌سازی هندسی اجکتور تک‌فاز مافوق صوت

نگار نباتیان* (استادیار)

مهران شیرازی (دانشجوی کارشناسی)

سعید جعفرزاده کناری (دانشجوی کارشناسی)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی

مهندسی مکانیک شریف، بهار ۱۴۰۰
دوره ۳-۳، شماره ۱، ص. ۷۸-۷۱

در پژوهش حاضر عملکرد اجکتور تک‌فازی مافوق صوت با سیال کاری هوا در نرم‌افزار آنسیس به صورت دوبعدی شبیه‌سازی شده است. هدف کار بررسی میدان‌های سرعت، فشار، رژیم جریان خروجی از نازل اولیه و نسبت مکش در شرایط مختلف عملکردی است. سپس برای رسیدن به بازده بیشتر، هندسه‌ی اجکتور با استفاده از الگوریتم چندهدفه‌ی ژنتیک بهینه‌سازی شده است. بهینه‌سازی با در نظر گرفتن اثر ۴ پارامتر هندسی شامل قطر خروجی نازل اولیه، فاصله‌ی خروجی نازل اولیه تا ورودی قسمت اختلاط سطح مقطع ثابت، قطر و طول قسمت اختلاط مقطع ثابت انجام شده است. نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که قطر قسمت اختلاط مقطع ثابت بیشترین تأثیر را بر روی دو تابع هدف نسبت مکش و نسبت فشار دارد. همچنین پس از بهینه‌سازی هندسه‌ی اجکتور مورد مطالعه، میزان نسبت مکش در حالت خفگی $11/8$ درصد و دامنه‌ی کارکرد آن 5 درصد افزایش یافته است.

واژگان کلیدی: اجکتور تک‌فاز، شبیه‌سازی دوبعدی، بهینه‌سازی دوهدفه، تحلیل حساسیت.

۱. مقدمه

به‌طور گسترده در چرخه‌های تبریدی و سرمایشی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. توان حرارتی تولیدی خورشیدی ناپایاست، یک چرخه‌ی سرمایشی شامل اجکتور با یک چرخه‌ی رانکین به‌منظور استفاده از حرارت اضافی برای تولید توان ترکیب شده و توسط تاشتوش^۱ و همکاران^۲ به صورت پارامتریک بررسی شده است. نتایج از طریق مدل‌سازی ترمودینامیکی و با استفاده از نرم‌افزارهای ای‌ای‌اس^۳ و اسیلون^۴ به دست آمده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از اجکتور دوکی شکل با قابلیت تغییر مساحت، با افزایش 45 درصدی نسبت سطح اجکتور، مقدار ضریب عملکرد^۴ چرخه را 78 درصد افزایش می‌دهد که همین امر نشان‌دهنده‌ی اهمیت هندسه‌ی اجکتور بر روی عملکرد این چرخه است. همچنین فشار ورودی نازل اولیه نیز در عملکرد آن تأثیر بسزایی دارد.

عملکرد اجکتور تابع پارامترهای مختلف هندسی، خصوصیات سیال به‌کار رفته و شرایط عملکردی است. از آن‌جا که اعمال تغییرات در نازل اولیه کم‌هزینه است و فقط با تعویض این بخش عملکرد اجکتور می‌تواند بهبود پیدا کند، بهبود عملکرد یک اجکتور با نقص فنی توسط شریفی و همکاران^۲ با مدل‌سازی عددی دوبعدی مورد بررسی قرار گرفته است. 10 مدل مختلف از نازل اولیه با ثابت نگه‌داشتن قطر ورودی و قطر گلوگاه طراحی شده است. مدل بهینه که فشار لازم را تأمین کرده است و بیشترین نسبت مکش را دارد، به‌عنوان هندسه‌ی بهینه انتخاب شده است. بیشترین نسبت فشار در این هندسه برابر با $5/27$ و نسبت مکش $0/155$ بوده

اجکتور از جمله تجهیزات پرکاربرد در صنعت محسوب می‌شود و از مزایای آن می‌توان به ساختار ساده (فاقد اجزای متحرک و دوار)، هزینه‌ی نگهداری پایین و ضریب اطمینان بالای آن اشاره کرد. اجکتورها بر اساس نوع جریان و مشخصات هندسی طبقه‌بندی می‌شوند. سیال کاری اجکتورها می‌تواند تراکم‌ناپذیر یا تراکم‌پذیر باشد که در حالت تراکم‌پذیر جریان‌های مادون صوت و مافوق صوت را شامل می‌شود. همچنین می‌تواند جریان تک‌فازی یا دوفازی باشد. از نظر هندسی نیز بسته به سطح مقطع نازل، تعداد نازل‌های اولیه به‌کار رفته و نوع آن (همگرا، همگرا-واگرا) و ناحیه‌ی اختلاط مقطع ثابت یا فشار ثابت طبقه‌بندی می‌شود.^۱ اجکتور به‌منظور بازیابی انرژی حرارتی حاصل از سوزاندن سوخت‌های فسیلی در بعضی از فرایندهای صنعتی، در چرخه‌های سرمایشی و تبرید تراکمی مورد استفاده قرار می‌گیرد تا میزان بهره‌وری استفاده از انرژی‌های تجدیدناپذیر افزایش پیدا کند و تا حد ممکن میزان آلاینده‌ها و آثار مخرب آن‌ها را بر روی محیط زیست کاهش دهد. به همین منظور و گستردگی کاربرد این تجهیز در صنعت مدل‌های گوناگونی ارائه شده است و همواره تلاش بر بهبود عملکرد آن وجود داشته و سعی شده است از طریق روش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی عملکرد اجکتور مطالعه و بررسی شود. همچنین، اجکتورها

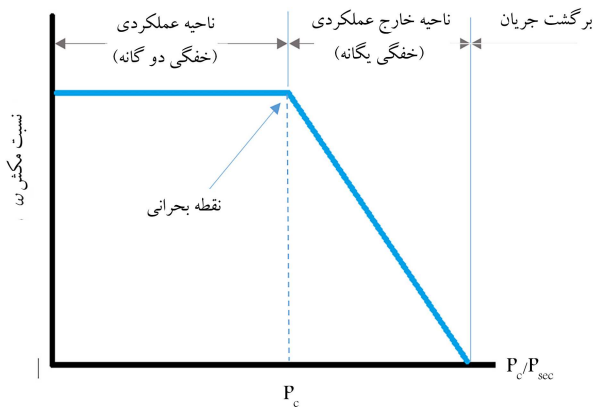
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۸/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۱/۸، پذیرش ۱۳۹۹/۱۱/۱۴

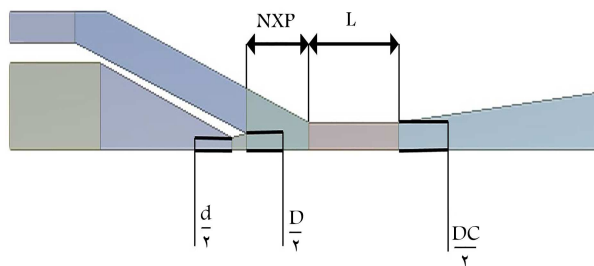
DOI:10.24200/J40.2021.57003.1567

است. همچنین، عملکرد اجکتور دیگری با بهینه‌سازی هندسه‌ی نازل اولیه توسط وانگ^۵ و همکاران^[۱] افزایش داده شده است. در این پژوهش دو زاویه‌ی ناحیه‌ی همگرا، واگرا و سه طول قسمت مقطع ثابت نازل اولیه، قسمت همگرا و واگرا به همراه زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اعتبارسنجی این مدل‌سازی دوبعدی به کمک نتایج تجربی انجام شده است. بر اساس نتایج به دست آمده طول قسمت مقطع ثابت، زاویه و طول ناحیه‌ی واگرایی بیشترین اهمیت را در نازل اولیه داشت و نسبت مکش نسبت به این ابعاد و زبری سطح آنها حساسیت بیشتری دارد. اثر پارامترهای مختلف هندسی با استفاده از مدل‌سازی عددی بر روی اجکتور با سیال تراکم‌ناپذیر توسط آرون^۶ و همکاران^[۵] بررسی شده است. صحت‌سنجی نتایج با میزان خطای ۱۰٪ با نتایج تجربی انجام شده است که این اختلاف ناشی از مدل‌سازی دوبعدی، مدل آشفتگی استفاده شده و خطاهای عددی است. نتایج بهینه‌سازی حاکی از آن است که شعاع نازل، زاویه‌ی دیفیوزر با افق و شعاع قسمت اختلاط مقطع ثابت نازل ثانویه پارامترهای غالب هستند که بر روی عملکرد اجکتور تأثیر می‌گذراند. مقصودی و همکاران^[۶] با شبیه‌سازی عددی چهار متغیر فاصله‌ی خروجی نازل اولیه تا ورودی قسمت اختلاط مقطع ثابت، زاویه‌ی قسمت واگرایی دیفیوزر، طول و قطر ناحیه‌ی اختلاط مقطع ثابت را بر روی عملکرد اجکتور که سیال عامل آن تراکم‌پذیر است، مطالعه کرده‌اند. مدل‌سازی بر اساس اطلاعات آزمایشی واقعی تنظیم شده و ۱۴۱ هندسه‌ی مختلف به منظور بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک در شرایط مختلف کاری شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که نسبت مکش نسبت به طول ناحیه‌ی مقطع ثابت بسیار حساس است و با بهینه‌کردن این پارامتر هندسی می‌توان عملکرد اجکتور را بهبود بخشید و همچنین فاصله‌ی نازل اولیه از ناحیه‌ی مقطع ثابت، زاویه‌ی واگرایی و طول دیفیوزر نیز بر عملکرد اجکتور تأثیر می‌گذراند. وارگا^۷ و همکاران^[۷] در مطالعه‌ی عددی خود سه عامل هندسی شامل نسبت مساحت نازل به ناحیه‌ی مقطع ثابت، محل خروجی نازل اولیه و طول ناحیه‌ی مقطع ثابت را در نظر گرفتند تا تأثیر متغیرهای هندسی را بر روی عملکرد اجکتور بررسی کنند. پژوهش آن‌ها مشخص کرد که وجود نسبت مساحت بهینه‌ی کاملاً به شرایط کاری اجکتور وابسته است و محل خروجی نازل اولیه هم‌زمان بر نسبت مکش و فشار پایین دست جریان اثر می‌گذارد. بهترین مکان برای خروجی نازل اولیه در فاصله‌ی تقریباً دو برابری نسبت به ورودی قسمت همگرایی نازل است که به ترتیب باعث افزایش ۵٪ و ۱۲٪ در نسبت مکش و فشار پایین دست جریان می‌شود. همچنین مشاهده شد که ۴ برابر شدن طول مقطع ثابت نسبت به قطر آن سبب افزایش فشار خروجی می‌شود ولی افزایش بیشتر این نسبت تغییری در عملکرد اجکتور ایجاد نمی‌کند؛ بنابراین ابعاد ذکر شده به‌عنوان حالت بهینه برای اجکتور مورد نظر اعلام شد. حکاکای فرد و همکاران^[۸] هندسه‌ی اجکتور را با در نظر گرفتن ۴ پارامتر غالب قطر خروجی نازل اولیه، مکان نازل اولیه و طول و قطر ناحیه‌ی مقطع ثابت بر اساس پارامتر هدف نسبت مکش به منظور بهینه‌کردن عملکرد اجکتور با کمترین تعداد شبیه‌سازی ممکن بررسی کردند. هندسه‌ی اجکتور به منظور کمیته‌کردن تعداد شبیه‌سازی عددی، با استفاده از روش مشخصه‌ها و منحنی‌های پارابولیک بازطراحی شد تا جریان‌های اولیه و ثانویه به‌طور موازی وارد ناحیه اختلاط شوند و همین‌طور از میزان تلفات اصطکاکی در طول نازل کاسته شود. میزان اتلاف ناشی از برگشت‌ناپذیری در ناحیه‌ی برخورد شوک‌های قوی در هندسه‌ی بهینه کاهش یافته است و عملکرد اجکتور ۲۹٪ نسبت به هندسه‌ی اولیه با کاهش اندک نسبت فشار ۲٫۶٪، بهبود یافته است. بر اساس نتایج، هندسه‌ی نازل اولیه و محل قرارگیری آن بیشترین تأثیر را بر عملکرد اجکتور داشته است. همان‌طور که اشاره شد، علاوه بر پارامترهای هندسی، شرایط عملکردی نیز بر بازده اجکتور تأثیر می‌گذراند. الهاب^۸ و همکاران^[۹] اثر پارامترهای عملکردی را

به همراه یک پارامتر هندسی برای تعیین فاصله‌ی مناسب نازل اولیه از ورودی مقطع ثابت بررسی کردند. شرایط عملکردی شامل دما و فشار نازل‌های اولیه و ثانویه و فشار خروجی بود. نتایج نشان داد که فاصله‌ی کم نازل اولیه از مقطع ثابت مانع اختلاط سیال ورودی از دو نازل و فاصله‌ی زیاد آن منجر به ایجاد جریان برگشتی می‌شود. با توجه به تأثیر متقابل عوامل مختلف بر عملکرد اجکتور، شش متغیر مؤثر شامل ۵ متغیر عملکردی و ۱ متغیر با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه در نرم‌افزار انسیس^۹ بهینه‌سازی شد که مقدار فاصله‌ی بهینه نازل اولیه تا قسمت مقطع ثابت ۰٫۶۲۵ برابر قطر قسمت اختلاط مقطع ثابت محاسبه شد. تحلیل حساسیت صورت گرفته بر روی نتایج نشان داد که بر روی دبی ورودی اولیه، متغیرهای فشار ورودی اولیه و فاصله‌ی نازل اولیه تا قسمت مقطع ثابت بیشترین حساسیت را دارند. یان^{۱۰} و همکاران^[۱۰] با در نظر گرفتن هر دو نوع پارامترها، اثر نسبت مساحت را برای شرایط مختلف عملکردی بررسی کردند. نتایج نشان داد که نسبت مساحت به‌صورت خطی با افزایش فشار نازل اولیه در بازه‌ی عملکردی افزایش می‌یابد و فشار بحرانی کاهش می‌یابد. با انجام آزمایش‌های تجربی، فاصله‌ی نازل اولیه از ورودی مقطع ثابت و نسبت مساحت‌ها بررسی شد تا ابعاد مناسب برای بهبود عملکرد اجکتور تعیین شود. بر اساس نتایج تجربی، برای نسبت‌های مساحت بالا، بازه‌ی بهینه‌ی فاصله‌ی نازل اولیه از ورودی مقطع ثابت کوچکتر می‌شود و بالعکس این روند نیز صادق است. کاریلو^{۱۱} و همکاران^[۱۱] با استفاده از تحلیل حساسیت و الگوریتم تکاملی چندهدفه توانستند هندسه‌ی اولیه اجکتور را برای دو سیال کاری متفاوت هوا و گاز کربن‌دی‌اکسید، بهینه‌سازی کنند. ابتدا با بهره‌گیری از روش تحلیل حساسیت میزان تأثیر متغیرهای هندسی بر نسبت مکش و فشار خروجی بررسی و مشاهده شد که قطر مقطع ثابت و قطر نازل اولیه در شرایط عملکردی این اجکتور تأثیر بیشتری نسبت به متغیرهای دیگر بر عملکرد اجکتور می‌گذراند و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک ابعاد بهینه شده را به دست آوردند. نتایج شبیه‌سازی عددی برای هندسه‌ی بهینه نشان داد که نسبت مکش اجکتور برای هر دو سیال برای فشار پایین دست ثابت بهبود یافته است و مقدار فشار پایین دست نیز با ثابت نگه‌داشتن نسبت مکش، افزایش پیدا کرده است. هان و همکاران^[۱۱] با استفاده از شبیه‌سازی عددی اثر لایه‌ی مرزی بر عملکرد اجکتور را بررسی کردند و نتایج حاصل را با نتایج تجربی اعتبارسنجی کردند، آن‌ها متوجه شدند که با تغییر قطر گلوگاه و خروجی نازل اولیه گرادیان فشاری و رفتار سیال در کناره‌های دیواره‌ی اجکتور به قدری تغییر می‌کند که با افزایش یا کاهش زیاد این دو پارامتر هندسی سبب ایجاد گرادیان فشاری معکوس در اجکتور و در نتیجه برگشت جریان سیال می‌شود و میزان دبی و نسبت مکش اجکتور به‌صورت چشم‌گیری کاهش می‌یابد و حتی به صفر میل می‌کند. الانصاری و جتر^[۱۲] دریافتند هنگامی که جریان اولیه با سرعت بسیار زیاد به جریان ثانویه، که سرعتش ناچیز است، می‌رسد و شروع به مخلوط شدن می‌کند، به دلیل اختلاف مومنتم دو جریان باعث تلفات انرژی می‌شود و در نتیجه کارایی اجکتور کاهش می‌یابد. آن‌ها ایده‌ی افزودن یک فاز دیگر را به جریان اولیه دادند، به این صورت که با افزودن یک مایع غیرفرار به شکل قطره به میرد که یک سیال فرار است سعی در کاهش مومنتم جریان اولیه و کاهش اختلاف مومنتم بین دو جریان، برگشت‌ناپذیری‌های و تلفات انرژی کنند. آن‌ها مدل نظری خود را با ساده‌سازی و مدل تعادلی همگن گسترش دادند، و با اضافه کردن روغن روان‌کار معدنی معمولی به‌عنوان مایع غیرفرار به میرد مفروض $R = 1 - 34a$ دریافتند که با افزودن مایع غیرفرار سرعت سیال اولیه در خروجی نازل کاهش می‌یابد و سرعت سیال ثانویه افزایش می‌یابد. در نتیجه نسبت مکش افزایش می‌یابد. در نتایج، این فرایند سبب افزایش ۱۰ برابری نسبت مکش اجکتور مذکور شده است.



شکل ۲. نمودار نسبت مکش به نسبت فشار.



شکل ۳. هندسه‌ی مسئله و متغیرهای مؤثر هندسی مورد بررسی.

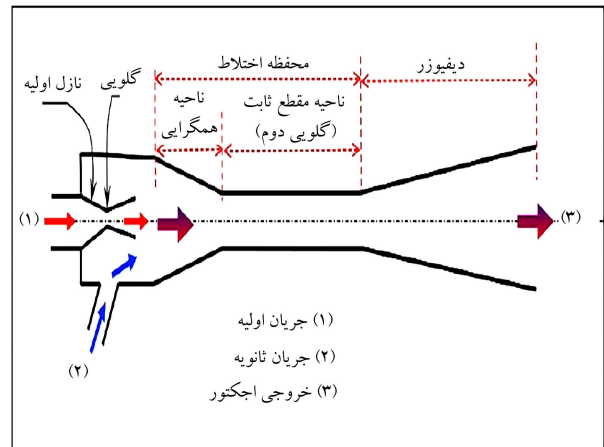
جدول ۱. ابعاد بی بعد شده‌ی هندسه‌ی اولیه‌ی اجکتور مدل.

قطر نازل اولیه	d
قطر خروجی نازل اولیه	$1/363d$
قطر ناحیه مقطع ثابت	$2/3d$
طول ناحیه مقطع ثابت	$19/8d$
طول ناحیه دیفیوزر	$44/24d$
طول نازل اولیه	$3/27d$
قطر ورودی اولیه اجکتور	$7/36d$
قطر ورودی ثانویه اجکتور	$2/62d$
قطر خروجی اجکتور	$4/85d$

ناحیه ثابت است و جریان در هر دو نازل در حالت خفگی قرار دارد. در ناحیه‌ی دوم، فشار از فشار بحرانی بیشتر است که باعث می‌شود نسبت مکش با افزایش فشار خروجی به سرعت کاهش یابد و فقط نازل اولیه در حالت خفگی است و ناحیه‌ی سوم که دیگر جریان ثانویه مکش نمی‌شود بلکه جریان برگشتی در ورودی نازل ثانویه وجود دارد. جریان اولیه در نازل اولیه همواره در حالت خفگی قرار دارد و این خفگی جریان ثانویه است که چگونگی عملکرد اجکتور و ثابت ماندن و نماندن نسبت مکش را تعیین می‌کند.

۲.۲. شرایط مرزی

هندسه‌ی اجکتور دو بعدی مورد بررسی در این مقاله برگرفته از پژوهش قبلی [۱۴] است. متغیرهای هندسی مؤثر بر عملکرد اجکتور مطابق شکل ۳ مشخص شده‌اند. هندسه‌ی دوبعدی که ابعاد بی‌بعد شده‌ی آن بر اساس قطر نازل اولیه است در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. طرح‌واره‌ی اساس کار یک اجکتور تک‌فاز مافوق صوت. [۱]

هدف اصلی این پژوهش بررسی و تحلیل هندسه‌ی اجکتور و مشخص کردن متغیرهای غالب در طراحی این اجکتور و سپس بهبود عملکرد اجکتور تک‌فاز مافوق صوت به وسیله‌ی بهینه‌سازی هندسه‌ی آن با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک چندهدفه [۱۲] و دینامیک سیالات محاسباتی است.

با توجه به اثر متقابل پارامترهای مختلف هندسی و شرایط عملکردی بر روی عملکرد اجکتور، با ثابت نگه‌داشتن شرایط عملکردی، بررسی هم‌زمان ۴ متغیر غالب هندسی در عملکرد اجکتور با استفاده از تحلیل حساسیت صورت گرفته و سپس الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای بیشینه کردن نسبت مکش [۱۳] و نسبت فشار بهینه‌سازی به‌کار گرفته شده است، که در ادامه روش انجام پژوهش و نتایج حاصل ارائه شده است.

۲. روش تحقیق

۲.۱. عملکرد اجکتور تک‌فازی مافوق صوت

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، اجکتور شامل دو نازل همگرا - واگرا است که از ۴ بخش نازل اولیه، بخش اختلاط، ناحیه‌ی مقطع ثابت و دیفیوزر تشکیل شده است. سیال بعد از عبور از نازل اولیه به سرعت مافوق صوت می‌رسد و در نتیجه ناحیه‌ی کم‌فشار در این قسمت ایجاد می‌شود. اختلاف فشار به وجود آمده بین ورودی نازل ثانویه و این ناحیه، باعث مکش سیال ثانویه می‌شود. پس از اختلاط دو سیال و انتقال مومنتموم بین آنها در مقطع ثابت سرعت سیال ثانویه می‌تواند به سرعت صوت برسد و در ناحیه‌ی ثابت خفگی ایجاد می‌شود. با توجه به اختلاف سرعت سیال اولیه و سیال ثانویه، لایه‌ی برشی ایجاد می‌شود که در اثر برخورد با این لایه و دیواره، زنجیره‌ی شوک‌های مایل و موج‌های انبساطی تشکیل می‌شود. زنجیره‌ی شوک‌ها منجر به کاهش سرعت جریان می‌شوند تا آنجایی که در انتهای قسمت اختلاط مقطع ثابت سرعت به مادون صوت می‌رسد و با عبور از دیفیوزر باقی انرژی جنبشی به انرژی پتانسیل تبدیل می‌شود و فشار افزایش می‌یابد تا به فشار خروجی طراحی برسد.

همان‌طور که اشاره شد، نقش اجکتور مکش جریان ثانویه و افزایش فشار آن تا فشار مورد نظر نقطه‌ی طراحی است. با وجود این، اجکتور همیشه در نقطه‌ی طراحی عمل نمی‌کند و ناحیه‌ی عملکردی آن مطابق شکل ۲ به ۳ بخش قابل تقسیم است. در ناحیه‌ی اول فشار خروجی از فشار بحرانی کمتر است و نسبت مکش در این

نظر گرفته شده است. دیواره های مرزی به صورت بی دررو با اعمال شرط مرزی عدم لغزش و دیواره های جانبی با شرط تقارن در نظر گرفته شده است. مدل آشفتگی متوسط رینولدز $k - \varepsilon$ استفاده شده است. ترم های انرژی آشفتگی و نرخ اتلاف توسط این ۲ معادله حل و مقدار ضریب لزجت آشفتگی مطابق معادله ۳ برای محاسبه تنش رینولدز در معادله ی مومنتوم مدل می کنند. شدت آشفتگی ۵ درصد در نظر گرفته شده است.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 3} P_{\varepsilon b}) \quad (2)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

که در معادلات فوق ρ چگالی سیال، U_j سرعت متوسط جریان در راستای j است. C_μ ، $C_{\varepsilon 1}$ ، $C_{\varepsilon 2}$ ، $C_{\varepsilon 3}$ ، σ_k و σ_ε ضرایب ثابت هستند. P_{kb} ، $P_{\varepsilon b}$ تأثیر نیروی شناوری را نشان می دهد که در مسئله ی ما نیروی شناوری بررسی نشده است و P_k تولید آشفتگی در اثر نیروهای لزجی را نشان می دهد که توسط معادله ی ۴ مدل شده است.

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \left(3\mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \quad (4)$$

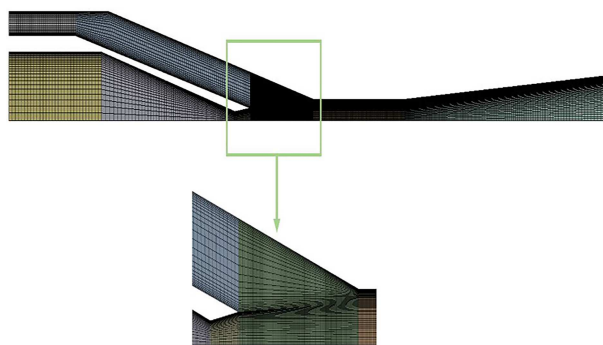
روش حل مسئله در شرایط پایاست، گسسته سازی معادلات ممتوم نیز با مرتبه ی دوم انجام شده است و شرط همگرایی رسیدن باقی مانده در معادلات به 10^{-6} لحاظ شده است، همچنین برای اطمینان از همگرایی نسبت مکش تا یک همگرایی نسبی حل ها ادامه یافته است.

۳.۲. الگوریتم چندهدفه ی ژنتیک

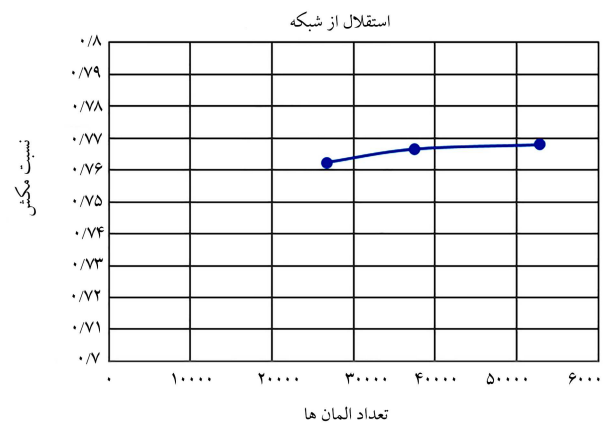
به منظور بهینه سازی عملکرد اجکتور چهار متغیر هندسی غالب شامل قطر خروجی نازل اولیه،^{۱۵} فاصله ی خروجی نازل اولیه تا ورودی قسمت اختلاط سطح مقطع ثابت،^{۱۶} قطر قسمت اختلاط مقطع ثابت^{۱۷} و طول قسمت اختلاط سطح مقطع ثابت^{۱۸} برای بهینه کردن تابع دوهده نسبت مکش و نسبت فشار بیشینه از الگوریتم بهینه سازی ژنتیک چندهدفه به منظور بهینه سازی اجکتور در نرم افزار انسیس استفاده شده است.

مقادیر اولیه ی پارامترهای هندسی مشخص شده است. بازه ی ۱۰ درصدی تغییرات این پارامترهای غالب تعریف شده است که بر اساس آنها، به صورت تصادفی هندسه های اولیه انتخاب و در سی اف ایکس^{۱۹} ایجاد می شوند. در اجرای شبیه سازی مقدار توابع هدف شامل نسبت مکش و فشار برای این هندسه های اولیه محاسبه می شود. سپس بسته به توابع هدف که در این مسئله بیشینه ی نسبت فشار و نسبت مکش اجکتور است، تابع ارزیابی بر اساس توابع هدف مشخص محاسبه و بر اساس میزان تناسب و نزدیکی آن ها به مقدار بهینه مرتب و دسته بندی می شوند.

بر اساس جمع برازندگی همه ی هندسه ها، احتمال انتخاب هر هندسه برای تولید هندسه های جدید بر اساس نسبت برازندگی آن بر برازندگی کل تعیین می شود. سپس هندسه های انتخابی بر اساس شانس ایجاد با استفاده از روش جابه جایی یا جهش تولید می شوند و مجدداً بر اساس میزان برازندگی انتخاب شده و فرایند تا رسیدن به



شکل ۴. شبکه بندی هندسه ی اجکتور.



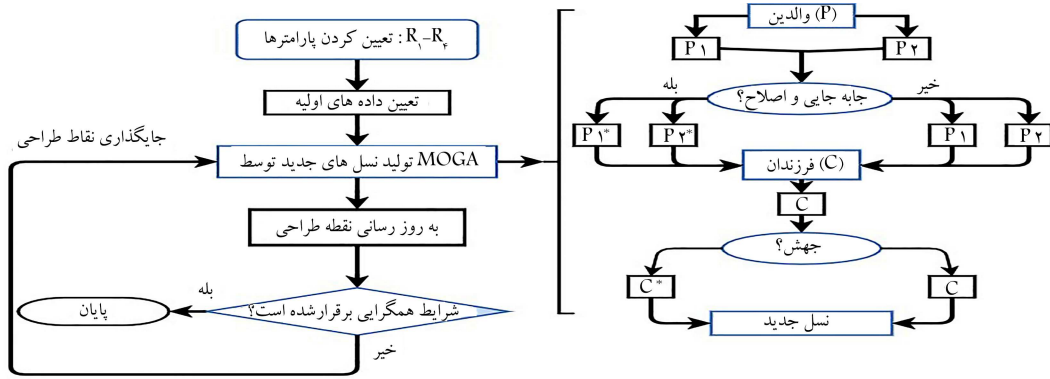
جدول ۲. مشخصات شبکه بندی های مختلف.

ریز	معمولی	درشت	
۵۳۸۶۵	۳۷۵۰۰	۲۶۶۹۳	تعداد اجزا
۱۰۷۸۸۲	۷۶۸۴۶	۵۴۹۴۸	تعداد گره
۰٫۷۶۸۱	۰٫۷۶۶۷	۰٫۷۶۲۳	نسبت مکش
			درصد تغییرات
۰٫۱۸۵	۰٫۵۷۶	-	نسبت به شبکه درشت تر

شبکه بندی توسط نرم افزار انسیس مشینگ^{۱۴} مطابق شکل ۴ به صورت ساختار یافته انجام گرفته است که چگالی شبکه در ناحیه برخورد دو سیال که منجر به لایه برشی شده و در مقطع ثابت که برهم کنش پیچیده یی از شوک ها و موج های انبساطی با لایه مرزی و دیواره ها صورت می گیرد بیشتر است. بیشینه مقدار y^+ در نزدیک دیواره برابر ۳۸ است تا شبکه وضوح کافی داشته باشد.

استقلال شبکه برای متغیر بی بعد نسبت مکش مطابق شکل ۵ بررسی شده و نتایج در جدول ۲ برای سه نوع شبکه ی درشت، معمولی و ریز ارائه شده است. در نهایت شبکه ی مناسب با تعداد گره های ۷۶۸۴۶ و تعداد اجزا برابر با ۳۷۵۰۰ انتخاب شده است.

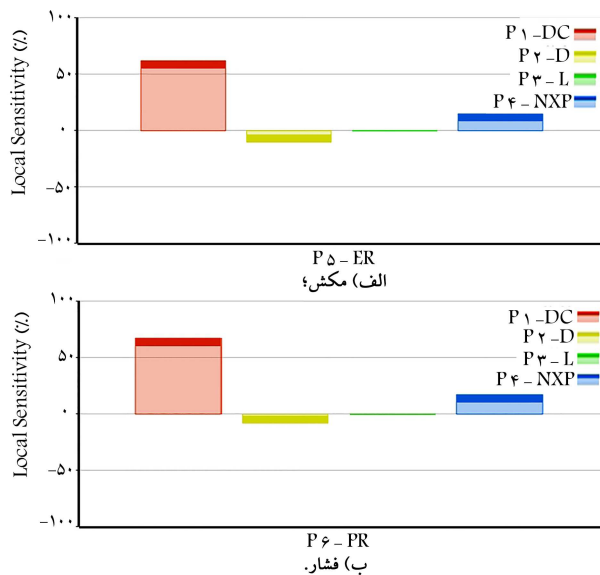
میدان جریان آشفته مافوق صوت برای سیال کاری هوا با فرض گاز ایده آل حل شده است. ورودی نازل اولیه به صورت ورودی فشاری با فشار ۴ بار و دمای ۱۳۰ درجه ی سانتی گراد و نازل ثانویه به صورت ورودی باز با فشار ۱ اتمسفر و دمای ۱۰ درجه سانتی گراد تنظیم شده است. خروجی سیال نیز به عنوان خروجی فشاری در



شکل ۶. روندنمای الگوریتم ژنتیک.

جدول ۳. تغییرات پارامترهای خروجی نسبت به هرکدام از پارامترهای ورودی.

$\Delta PR/\Delta$	$\Delta ER/\Delta$	$\Delta PR[\%]$	$\Delta ER[\%]$	$\Delta [\%]$	
۰	-۰٫۰۰۰۵۶	۰	-۰٫۰۰۰۵۲	۱۰	<i>L</i>
-۰٫۰۳۲۶	-۰٫۰۵۷۷	-۰٫۳۲۵۸	-۰٫۷۶۹۹	۱۰	<i>NXP</i>
-۰٫۰۲	-۰٫۳۵۹	-۰٫۲	-۳٫۵۹	۱۰	<i>DC</i>
-۰٫۰۰۸۳	-۰٫۱۵۶۵	-۰٫۰۸۲۶	-۱٫۵۶۵۵	۱۰	<i>D</i>



شکل ۷. میزان حساسیت چهار پارامتر ورودی به نسبت الف و ب.

بر اساس نتایج تحلیل حساسیت انجام شده، در شکل ۸ شرایط عملکردی نقطه‌ی طراحی، قطر قسمت اختلاط مقطع ثابت پارامتر غالب بر روی عملکرد اجکتور است. پس از آن قطر خروجی نازل اولیه و فاصله‌ی خروجی نازل اولیه تا ورودی قسمت اختلاط سطح مقطع ثابت نیز دارای تأثیر قابل توجهی روی عملکرد اجکتور هستند، اما طول قسمت اختلاط سطح مقطع ثابت در بازه‌ی تغییرات ۱۰ درصد، تأثیر کمتری دارد. مقدار حساسیت نسبت مکش برای پارامترهای *DC*، *NXP*، *L* و *D* به ترتیب برابر با ۱۷٪، ۱۵٪، ۱۴٪، ۱۰٪- درصد است و مقدار حساسیت نسبت فشار برای همین پارامترها به ترتیب ۱۷٪، ۱۷٪، ۹۱٪- و ۷۹٪- درصد است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، با بیش از ۶۰ درصد حساسیت، پارامتر غالب شعاع قسمت اختلاط مقطع ثابت است.

نسبت مکش و فشار بیشینه ادامه می‌یابد. تولید هندسه از روش جهش مانع انتخاب هندسه با مقادیر توابع بهینه محلی می‌شود.

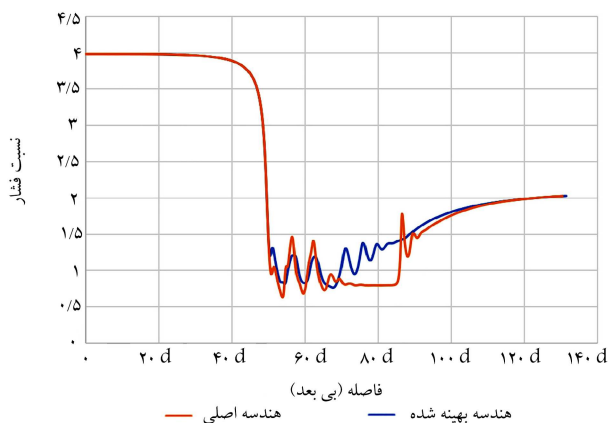
در شکل ۶ فرایند بهینه‌سازی با این روش در قالب فلوجارت رسم شده است. در بهینه‌سازی، تعداد نمونه‌هایی که در هر تکرار مورد بررسی قرار می‌گیرند ۱۰۰ نمونه (چهار پارامتر ورودی و ۲۵ نقطه‌ی آزمایش) در نظر گرفته شده است. شرط همگرایی تعداد محاسبه‌ی توابع هدف است که تعداد تکرارها نیز ۲۰ تکرار انتخاب شده است که بعد از ۱۰ تکرار مسئله همگرا می‌شود. بیشینه‌ی درصد مجاز پارتو^{۲۰} که حاصل نسبت نمونه‌های مطلوب پارتو به کل نمونه‌های هر تکرار است در این مسئله ۷۰ درصد در نظر گرفته شده است. درصد پایداری همگرایی^{۲۱} که پایداری جمعیت را بر اساس میانگین و انحراف معیار بیان می‌کند نیز ۲ درصد فرض شده است.

۳. بحث و تحلیل نتایج

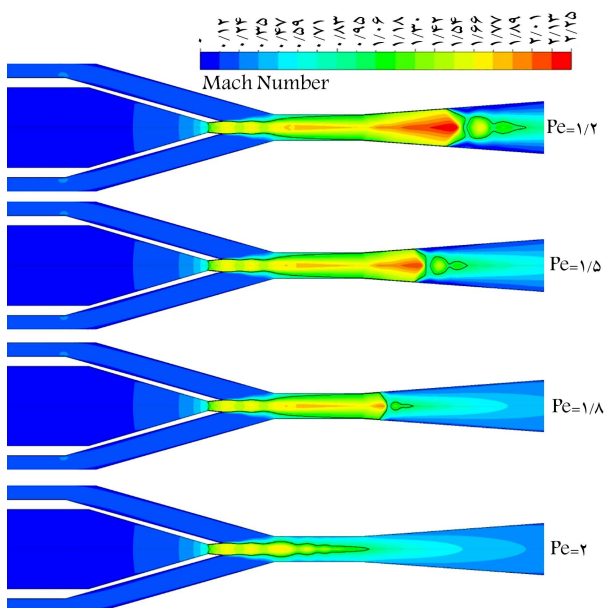
۳.۱. حساسیت‌سنجی متغیرهای هندسی

با توجه به تأثیر متقابل پارامترهای هندسی بر یکدیگر و بر روی دو پارامتر خروجی نسبت مکش و نسبت فشار، تأثیر هم‌زمان تغییر پارامترها بر روی توابع خروجی با استفاده از تحلیل رگرسیون در انسیس بررسی شده است. در این تحلیل مجموع مربع نفاضل تابع پیش‌بینی شده و پارامترهای نمونه‌ی وابسته کمینه می‌شود. ضریب تشخیص^{۲۲} میزان همبستگی دسته‌ی داده‌ها شامل پارامترهای ورودی هندسی و پارامترهای خروجی را نشان می‌دهد. هر چقدر این عدد نزدیک به ۱ باشد، نشان می‌دهد که تابع خروجی پیش‌بینی شده از پارامتر ورودی مشخص شده تأثیر بیشتری می‌گیرد و از اکثر نقاط جدول آزمایش مربوط به آن پارامتر ورودی عبور می‌کند. در ضریب تشخیص‌های نزدیک به صفر، اثر پارامتر در توابع خروجی کمتر است.

مطابق جدول ۳ در بررسی اثر قطر ناحیه‌ی مقطع ثابت بر روی پارامتر خروجی نسبت مکش، با افزایش قطر مقطع ثابت، فضای بیشتری برای انبساط جریان خروجی از نازل اولیه و در نتیجه ایجاد ناحیه‌ی کم‌فشار بزرگتری فراهم می‌شود. در نتیجه، امکان مکش جریان بیشتری از نازل ثانویه و عبور آن از مقطع ثابت فراهم می‌شود که با توجه به ثابت بودن دبی نازل اولیه منجر به افزایش نسبت مکش می‌شود. دیگر پارامترها هم به صورت مجزا در روی توابع خروجی تأثیر می‌گذارند. حال آنکه تأثیر ۴ پارامتر هندسی به صورت هم‌زمان در نمودار تحلیل حساسیت شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۹. نمودار نسبت فشار در طول اجکتور در دو هندسه اصلی و بهینه.

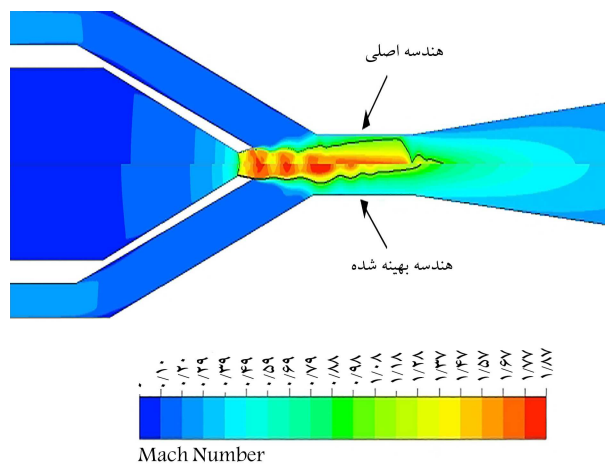


شکل ۱۰. کانتور ماخ اجکتور بهینه شده در فشارهای خروجی متفاوت.

قدرت شوک جدید و موقعیت آن، نسبت مکش در هندسه بهینه شده افزایش یافته است. با حرکت شوک به سمت بالادست، نوسانات فشار هم در هندسه بهینه مطابق شکل ۹ در دیفیوزر کاهش یافته و به مقطع ثابت منتقل شده است. کانتور ماخ برای شرایط مختلف عملکردی تا قبل از فشار بحرانی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در کانتورهای ماخ همه نسبت های فشار مشخص است که به دلیل اختلاف سرعت جریان اولیه و ثانویه یک لایه مرزی آزاد تشکیل می شود که همانند نازل برای جریان ثانویه عمل می کند. بنابراین جریان ثانویه آرام با رسیدن به ناحیه اختلاط سرعت می گیرد و در ناحیه مقطع ثابت مخلوط جریان به حالت خفگی می رسد. جریان مافوق صوت خروجی از نازل اولیه با برخورد به دیواره لایه مرزی آزاد و به صورت موج فشاری به سمت محور تقارن برگشته و تشکیل شوک مایل می دهند. با ادامه جریان به سمت پایین دست، شوک مایل مجدد به دیواره لایه مرزی برخورد می کند و به صورت موج انبساطی باز می گردد. در نتیجه دنباله بی از شوک ها و موج های انبساطی در داخل ناحیه مقطع ثابت به وجود می آید که رفته رفته به دلیل افت های ناشی از لایه برشی آشفته بین دو جریان در اثر اصطکاک و برخورد موج ها، قدرت آنها کاهش می یابد. همان طور که در شکل ۱۱

جدول ۴. کاندیداهای منتخب بعد از بهینه سازی.

نوع پارامتر	پارامتر	کاندیدای	
		اول	دوم
پارامترهای طراحی	L	۲۱,۷۵d	۲۱,۴۵d
	NXP	۱۲,۹۷۳d	۱۲,۹۵۳d
	DC	۲,۴۵۳۴d	۲,۴۴۹۲d
	D	۱,۲۳۲۱d	۱,۲۳۹۲d
تابع هدف	ER	۰,۸۵۰۲	۰,۸۴۷۲
	PR	۲,۰۷۱۲	۲,۰۷۰۹



شکل ۸. کانتور ماخ اجکتور در هندسه اولیه و هندسه بهینه.

۲.۳. بهینه سازی هندسه

نقطه کاری ایده آل برای یک اجکتور زمانی است که شوک نرمال دقیقاً در خروجی قسمت اختلاط مقطع ثابت باشد تا میزان افت فشار کل به حداقل مقدار خود برسد و بازیابی فشار جریان فرسودگی در ادامه در دیفیوزر صورت گیرد. ولی وجود لایه مرزی و برهم کنش شوک ها با این لایه باعث می شود که در ناحیه ورودی دیفیوزر به جای شوک نرمال، شوک مایل شکل بگیرد. هندسه اجکتور تک فازی مورد مطالعه طبق پژوهش پیشین در نسبت فشار ۲ در نقطه کاری خود قرار می گیرد. شایان ذکر است که نتایج شبیه سازی هندسه اولیه با نتایج تجربی موجود بررسی و اعتبارسنجی شده است.^[۱۵] بنابراین بهینه سازی عملکرد اجکتور با الگوریتم موگا با تغییر چهار پارامتر هندسی ذکر شده در این نسبت فشار انجام شده است. مطابق جدول ۴، سه هندسه برتر به دست آمده از بهینه سازی قابل مشاهده است.

هندسه منتخب اول به دلیل این که بیشترین مقدار نسبت مکش و فشار را حاصل می کند، به عنوان هندسه بهینه برگزیده شده است. کانتور ماخ هندسه اولیه و بهینه در شکل ۸ با هم مقایسه شده اند. با زیاد شدن طول مقطع ثابت، در هندسه بهینه، شوک مایل قوی به داخل قسمت مقطع ثابت کشیده شده است و قدرت شوک مایل کاهش یافته و جریان مادون صوت در داخل دیفیوزر، باقی افزایش فشار تا رسیدن به فشار خروجی را به دلیل افزایش مساحت و کاهش سرعت تأمین خواهد کرد. بنابراین با وجود رسیدن به فشار خروجی یکسان ۲ در هر دو هندسه، به دلیل کاهش اتلاف فشاری در هندسه بهینه بازده اجکتور افزایش می یابد. با توجه به



شکل ۱۳. نسبت مکش بر حسب نسبت فشار در دو هندسه اصلی و بهینه شده.

عبور جریان مکشی نازل ثانویه کاهش می‌یابد. بنابراین در نسبت فشار ۲/۱، به دلیل حرکت دنباله شوک‌ها و موج‌های انبساطی به بالادست جریان و ضعیف‌تر شدن شوک‌ها و برهم‌کنش آن با جریان مادون صوت ثانویه، به دلیل افزایش فشار مکش و عدم وجود اختلاف فشار لازم برای مکش دبی جریان ثانویه کاهش می‌یابد و نسبت مکش کمتر می‌شود. با افزایش بیشتر نسبت فشار، جریان برگشتی در نازل ثانویه ایجاد خواهد شد.

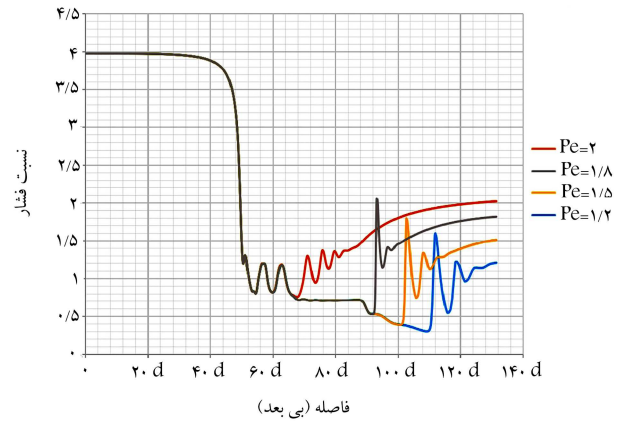
شکل ۱۳ نشان می‌دهد که در هندسه بهینه، میزان نسبت مکش در حالت خفگی افزایش ۱۱/۸ درصدی داشته است و تا نسبت فشار پایین‌تری کارایی دارد که دامنه‌ی کارکرد آن حدود ۵ درصد افزایش یافته است. همچنین با تغییر شرایط عملکردی در نازل اولیه امکان رسیدن به نسبت فشارهای بالاتر با نسبت مکش متناسب نیز امکان‌پذیر است که در مطالعات بعدی بررسی خواهد شد.

۴. نتیجه‌گیری

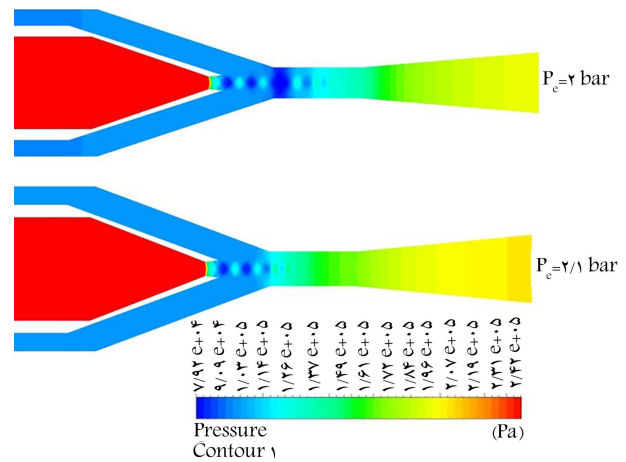
در این پژوهش، میدان جریان یک اجکتور تک فاز مافوق صوت با شبیه‌سازی دوبعدی در نرم‌افزار آنسیس بررسی و سپس به منظور افزایش بازده، هندسه اجکتور با در نظر گرفتن ۴ پارامتر هندسی شامل قطر خروجی نازل اولیه، فاصله‌ی خروجی نازل اولیه تا ورودی قسمت اختلاط سطح مقطع ثابت، قطر قسمت اختلاط مقطع ثابت و طول قسمت اختلاط سطح مقطع ثابت بهینه‌سازی شد. به کمک تحلیل حساسیت پارامتر هندسی غالب بر عملکرد این اجکتور مشخص شد. هندسه بهینه شده برای نسبت‌های مختلف فشار با مدل‌سازی عددی شبیه‌سازی شد. نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر است:

۱. قطر ناحیه‌ی اختلاط مقطع ثابت بیشترین اثر را بر روی عملکرد اجکتور می‌گذارد. دو پارامتر قطر خروجی نازل اولیه و فاصله‌ی خروجی نازل اولیه تا ورودی قسمت اختلاط سطح مقطع ثابت نیز تأثیر قابل توجهی روی عملکرد اجکتور دارند. این در حالی است که طول قسمت اختلاط سطح مقطع ثابت در بازه‌ی تغییرات ۱۰ درصد، تأثیر کمتری نسبت به سه پارامتر دیگر دارد؛

۲. با افزایش نسبت فشار، زنجیره‌ی شوک به سمت بالادست جریان حرکت می‌کند و در فشار نقطه‌ی طراحی جریان در داخل دیفیوزر به صورت مادون صوت با افزایش مساحت، باقیمانده‌ی افزایش فشار تا رسیدن به فشار



شکل ۱۱. نمودار تغییرات فشار در طول اجکتور برای نسبت فشارهای خروجی متفاوت.



شکل ۱۲. کانتورهای فشار در نسبت فشار ۲ و ۲/۱.

مشخص است با افزایش فشار خروجی، شوک مایل به سمت بالادست ناحیه‌ی مقطع ثابت کشیده می‌شود.

نمودار تغییرات فشار روی محور تقارن برای نسبت فشارهای مختلف نیز رسم شده است. مطابق نمودار شکل ۱۱، نوسانات فشار در موقعیت ۶۰ d نشانه‌ی وجود زنجیره‌ی شوک‌هاست که با تغییر فشار قسمت خروجی اجکتور، تفاوت چشم‌گیری در این ناحیه دیده نمی‌شود. افزایش نسبت فشار ناگهانی زیاد در نمودار، نشانه‌ی وجود شوک مایل قوی است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده شد، با افزایش فشار خروجی، این تغییر ناگهانی در فشار به سمت قسمت اختلاط مقطع ثابت جابه‌جا می‌شود تا جایی که در نسبت فشار ۲ شوک مایل قوی در داخل قسمت مقطع ثابت دیده می‌شود. به طور میانگین، تا زمانی که شوک مایل قوی در قسمت واگرایی دیفیوزر است، به ازای هر ۰/۳ کاهش در نسبت فشار خروجی، شوک مایل قوی به اندازه‌ی ۸ d به عقب کشیده می‌شود. در حالی که این اندازه زمانی که شوک مایل قوی وارد ناحیه‌ی مقطع ثابت می‌شود، به ازای ۰/۲ کاهش در نسبت فشار خروجی، سه برابر می‌شود.

مطابق شکل ۱۲ فشار بلافاصله در خروجی نازل اولیه شروع به کاهش می‌کند. دلیل این امر این است که فشار خروجی از نازل اولیه بیشتر از فشار محیط است که با عبور از موج‌های فرو انبساطی خود را به فشار محیط می‌رساند. در اثر عبور از امواج انبساطی، خطوط جریان نازل اولیه با زاویه‌ی بالایی باز می‌شود و مسیر

باعث کاهش سطح مقطع عبوری جریان ثانویه می‌شود و در نسبت فشارهای بالای نقطه‌ی بحرانی، مشجر به کاهش نسبت مکش می‌شود؛

۵. با بهینه‌سازی هندسه‌ی اجکتور نسبت مکش آن در حالت خفگی دوگانه ۱۱٫۸ درصد افزایش یافته است. از طرف دیگر، با وجود افت اندک نسبت مکش اجکتور بهینه شده در نسبت فشارهای بالاتر ۲٫۱ در مقایسه با هندسه‌ی اصلی، دامنه‌ی کارکرد آن ۵ درصد افزایش یافته است که این امر امکان استفاده از اجکتور در شرایط عملکردی گسترده‌تری را فراهم می‌کند.

خروجی را تأمین می‌کند که منجر به اتلاف فشاری کمتر و بازده بیشتر می‌شود؛

۳. تا زمانی که شوک مایل قوی در قسمت واگرایی دیفیوزر به وجود می‌آید، به ازای هر ۰٫۳ کاهش در نسبت فشار خروجی، شوک مایل قوی به اندازه‌ی $8d$ به عقب کشیده می‌شود. این اندازه، زمانی که شوک مایل قوی وارد ناحیه‌ی مقطع ثابت می‌شود، به ازای ۰٫۲ کاهش در نسبت فشار خروجی، سه برابر می‌شود؛

۴. با افزایش فشار، جریان خروجی از نازل اولیه فرو انساطی است که این امر

پانوشتها

1. Tashtoush
2. EES
3. Epsilon
4. COP
5. Wang
6. Arun
7. Szabolcs Varga
8. Elhub
9. Ansys
10. Yan
11. Carrillo
12. MOGA(Multi-Objective Genetic Algorithm)
13. entrainment ratio
14. ansys meshing
15. D
16. NXP
17. DC
18. L
19. CFX
20. maximum allowable pareto percentage
21. convergence stability percentage
22. coefficient of determination

منابع (References)

1. Aidoun, Z. "Current advances in ejector modeling, experimentation and applications for refrigeration and heat Pump", *Inventions*, **4**, pp.1-73 (2019).
2. Tashtoush. "Parametric study of a novel hybrid solar variable geometry ejector cooling with organic rankine cycles", *Energy Conversion and Management*, **198**, pp.111910 (2019).
3. Sharifi, N. "Reducing energy consumption of a steam ejector through experimental optimization of the nozzle geometry", *Energy*, **66**, pp.860-867 (2014).
4. Wang, Wang, L. "Numerical study on optimization of ejector primary nozzle geometries", *International Journal of Refrigeration*, **76**, pp.219-229 (2017).
5. Arun, B.H. "Ejector pump CFD model validation and performance improvement studies", *Journal of Scientific & Industrial Research*, **77**, pp.353-358 (2018).
6. Maghsoodi, A. "Optimization of geometric parameters for design a high-performance ejector in the proton exchange membrane fuel cell system using artificial neural network and genetic algorithm", *Applied Thermal Engineering*, **71**, pp.410-418 (2014).
7. Vargaa, S. "Influence of geometrical factors on steam ejector performance a numerical assessment", *Refrigeration*, **32**, pp.1694-1701 (2009).
8. Hakkaki-Fard, A. "A computational methodology for ejector design and performance maximization", *Energy Conversion and Management*, **105**, pp.1291-1302 (2015).
9. Elhub, B. "Performance evaluation and parametric studies on variable nozzle ejector using R134", *Case Thermal Engineering*, **12**, pp.258-270 (2018).
10. Yan, J. "Experimental study on performance of a hybrid ejector-vapor compression cycle", *Energy Conversion and Management*, **113**, pp.36-43 (2016).
11. Carrillo, J. "Single-phase ejector geometry optimisation by means of a multiobjective evolutionary algorithm and a surrogate CFD model", *Energy*, **164**, pp.46-64 (2018).
12. Han, Y. "CFD simulation on the boundary layer separation in the steam ejector and its influence on pumping performance", *Energy*, **167**, pp.469-483 (2019).
13. Al-Ansarym H.A. "Numerical and experimental analysis of single-phase and two-phase flow in ejectors", *HVA C&R Research*, **10**, pp.521-538 (2004).
14. Mohammadi, V. "Study of two-phase ejector performance by numerical simulations", Tehran: Shahid Beheshti University (In Persian) (2017).
15. Hemidi, A. "CFD analysis of a supersonic air ejector, part I: experimental validation of single-phase and two-phase operation," *Applied Thermal Engineering*, **29**, pp. 1523-1531 (2009).