

طراحی، تحلیل و بهینه‌سازی نازل تزریق اجکتور تونل باد مافوق صوت

فرهاد قدک^۲

دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۶/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۱/۲۸)

محسن محمدی^۱

دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

در این پژوهش، دانش فنی جهت طراحی نازل تزریق اجکتور تونل باد مافوق صوت ارائه شده و بر مبنای آن نازل تزریق جدیدی برای اجکتور یک تونل باد مافوق صوت طراحی می‌گردد. حلزونی، نازل و پره‌ها اجزاء نازل تزریق را تشکیل می‌دهند. نازل تزریق جدید به صورت عددی شبیه‌سازی شده و نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از تحلیل عددی نازل تزریق موجود در اجکتور تونل باد مقایسه می‌شود. این مقایسه حاکی از آن است که بازده در نازل تزریق جدید به میزان ۲/۱٪ بیشتر از نازل تزریق موجود است. همچنین، نازل تزریق جدید از نظر یکنواختی توزیع سرعت جریان خروجی و سایر موارد عملکرد بهتری نسبت به نازل تزریق موجود دارد. مقیاس کردن و نگاشت در منحنی‌های آیرودینامیکی از قبل طراحی شده به روش طراحی معکوس، و استفاده از آن برای سایر موارد مشابه، ایده ابتکاری به کار رفته در این مقاله به شمار می‌آید.

واژه‌های کلیدی: اجکتور، تونل باد مافوق صوت، طراحی معکوس، مجرای حلزونی.

Design, Analysis and Optimization of the Ejector Injection Nozzle Supersonic Wind Tunnel

M. Mohammadi

Imam Hossein University

F. Ghadak

Imam Hossein University

(Received: 5 September, 2013 ; Accepted: 17 February, 2014)

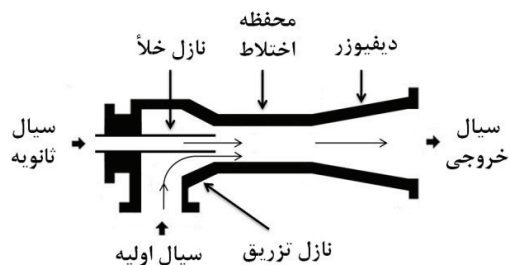
ABSTRACT

In this article, an algorithm for designing of a supersonic wind tunnel injection nozzle ejector is presented and based on this algorithm, a new ejector is designed for a supersonic wind tunnel. The injection nozzle consists of a volute, a nozzle, and several vanes. Designed injection nozzle is simulated numerically, and the results are compared with the present injection nozzle. The results show the efficiency in the designed version is higher about 2.1%. Besides, the flow uniformity of the new injection nozzle is better and other are occurred in it. Scale-up and mapping the pre designed aerodynamic curves with inverse design method, and use it for other similar cases is one of the innovations of this article.

Keywords: Ejector, Supersonic Wind Tunnel, Inverse Design Problem, Volute.

۱- دانشجوی دکتری: m_mohammadi1363@yahoo.com

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): fghadak@ihu.ac.ir



شکل (۱): شماتیکی از هندسه اجکتور.

همان گونه که در این شکل دیده می شود تزریق جریان اولیه توسط نازل تزریق به درون محفظه اختلاط، موجب کاهش فشار در محفظه اختلاط و نازل خلأ شده و به این ترتیب سیال ثانویه از درون نازل خلأ و محفظه آزمون مکیده شده و به درون محفظه اختلاط وارد می شود. جریان اولیه و ثانویه پس از اختلاط در محفظه اختلاط با عبور از دیفیوزر وارد هوای اتمسفر می گردد.

نتایج حاصل از طراحی بهینه نازل تزریق عبارت است از:

- یکنواختی در توزیع جریان خروجی از نازل تزریق
- بهبود در اختلاط جریان در محفظه اختلاط
- افزایش سرعت جریان عبوری از محفظه آزمون
- افزایش بازده تونل باد

چاو^۱ و همکارش [۲] به بررسی اثر متقابل میان جریان اولیه و ثانویه در سامانه های اجکتور مافوق صوت و مشخصات عملکردی آنها پرداختند. در این تحقیق قوانین حاکم بر جریان سیال و اثر متقابل میان دو جریان اولیه و ثانویه و همچنین تأثیر لزجت میان آنها بررسی شده است. در ادامه به کمک تحلیل عددی، اثر پارامترهای مؤثر بر جریان در سرعت های مختلف مورد مطالعه قرار گرفت.

در تحقیقی دیگر، چاو و همکارش [۳] مشخصات سامانه های اجکتور مافوق صوت با پوشش سطح غیر ثابت را بررسی نمودند. در این مطالعه مدل جریانی برای سیستم های اجکتور مافوق صوت ارائه شد که اثر متقابل میان جریان های اولیه و ثانویه در دو حالت لزج و غیرلزج بودن سیال در نظر گرفته شده است. مقایسه بین نتایج حاصل از محاسبات با نتایج تجربی بیانگر صحت فرضیات در نظر گرفته شده است.

اندرسون^۲ [۴] به مطالعه فاکتورهای مؤثر بر روی آنالیز و طراحی نازل های اجکتور پرداخت. در این تحقیق ابتدا تئوری مربوط به جریان های لزج در سیال اولیه و ثانویه در نازل اجکتور ارائه شده است. سپس متغیرهای مؤثر بر اختلاط

فهرست علائم و اختصارات

A	سطح، m^2
A^*	سطح گلوگاه نازل، m^2
P	فشار استاتیکی، pa
P_0	فشار کل، pa
R	شعاع، m
T	دما، K

علائم یونانی

φ	زاویه محیطی حلزونی حول مرکز آن، degree
μ	ویسکوزیته دینامیکی، pa.s
μt	ویسکوزیته آشفته، pa.s

زیر نویس

1	ورودی به حلزونی
2	خروجی از حلزونی

۱- مقدمه

تونل باد یکی از کاربردی ترین تجهیزات در آیرودینامیک تجربی است. جهت انجام تست در تونل باد، مدل کوچکی از شیء موردنظر درون محفظه آزمون تونل باد قرار داده شده و با گذراندن جریان از روی جسم، ضرایب آیرودینامیکی آن به دست می آید. جهت ایجاد جریان در محفظه آزمون تونل باد، روش های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش ها استفاده از اجکتور به منظور ایجاد خلأ در پایین دست جریان و به حرکت درآوردن جریان سیال در محفظه آزمون است. برای نمونه می توان به اجکتور یک تونل باد مافوق صوت و اجکتور تونل های باد ماوراءصوت T-116-TsAGI و T-117-TsAGI [۱] اشاره کرد. اجزاء اجکتور عبارتند از: نازل تزریق، نازل خلأ، محفظه اختلاط و دیفیوزر. به طور کلی، اجکتورها از لحاظ رژیم کاری و سرعت سیال خروجی از نازل تزریق به دو دسته تقسیم بندی می شود:

• صوتی

• مافوق صوت

همچنین دسته بندی اجکتورها از لحاظ موقعیت نازل تزریق و هندسه به دو صورت زیر است:

• مرکزی

• شعاعی

در شکل ۱ شماتیکی از هندسه اجکتور با نازل تزریق از نوع شعاعی نشان داده شده است. در این نوع از اجکتور، نازل خلأ در مرکز و نازل تزریق به صورت محیطی در اطراف آن قرار دارد. در اجکتور با نازل تزریق مرکزی، موقعیت نازل تزریق و نازل خلأ عکس حالت نشان داده شده در شکل ۱ است.

1-Chow

2-Anderson

پژوهش تصاویری از جریان اجکتور موردنظر با استفاده از روش‌های تصویربرداری شیلیر و سایه ارائه شده است.

وتواناوت^۹ [۹] به بهینه‌سازی اجکتور با استفاده از تحلیل عددی پرداخت. در این پژوهش در ابتدا هندسه یک اجکتور جهت شبیه‌سازی انتخاب گردید. سپس با تغییر در اجزاء هندسی اجکتور، مقادیر بهینه آنها در هر یک از موارد ذیل به دست آمد:

- طول اجکتور
- قطر گلوگاه و دهانه
- موقعیت نازل
- منحنی ورودی از مقطع همگرایی
- نسبت تراکم بهینه

نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر آن است که با بهینه‌سازی بر اساس روش فوق، می‌توان بازده اجکتور را بسیار بهبود بخشید.

احمدزادگان و همکارانش [۱۰] به مطالعه عددی در رابطه با اثر اندازه طول اختلاط و حرکت چرخشی سیال در محفظه اختلاط بر روی عملکرد اجکتور پرداختند. در این تحقیق جهت انتقال مؤثر مومنتم از سیال اولیه به ثانویه، اندازه طول محفظه اختلاط چهار برابر قطر آن در نظر گرفته شد. همچنین مشخص شد که انتخاب نوع شبکه و روش حل عددی، تأثیر بسیار زیادی بر روی نتایج به دست آمده در مدل کردن جریان چرخشی، جریان ثانویه و لایه اختلاطی آشفته درون اجکتور را دارد.

نیلی و همکارانش [۱۱] به طراحی اجکتور تک‌مرحله‌ای، دومرحله‌ای و سه‌مرحله‌ای برای یک تونل باد پرداختند. در این تحقیق با در نظر گرفتن ابعاد، عدد ماخ، دمای استاتیک و فشار سکون محفظه آزمون، پارامترهای مورد نیاز اجکتور تک‌مرحله‌ای، دومرحله‌ای و سه‌مرحله‌ای تونل‌باد شامل دبی، سرعت و فشار سکون محاسبه شده است. در طراحی صورت گرفته دو فرض اساسی برای حل معادلات حاکم استفاده شده است. اول اینکه فشار سکون برای هر سه اجکتور برابر باشد و دومین فرض اینکه عدد ماخ هر سه اجکتور برابر باشد. برای ارزیابی صحت نتایج کد محاسباتی توسعه داده شد و با نتایج آزمایشگاهی تونل باد با عدد ماخ محفظه آزمون برابر ۲ مقایسه گردید که در نتیجه اختلاف بین ۵ تا ۷ درصد مابین کد روش طراحی و نتایج تجربی مشاهده گردید.

در این مقاله ابتدا با استفاده از تحلیل عددی، عملکرد نازل تزریق موجود (نازل تزریق قدیمی) در اجکتور تونل‌باد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، بررسی نتایج حاکی از عملکرد نامناسب

جریان و لایه مرزی در اجکتور بررسی شدند. در انتها بین نتایج حاصل از تئوری‌های در نظر گرفته شده و همچنین نتایج حاصل از حل عددی و نتایج تجربی مقایسه انجام گرفته است. در این تحقیق بررسی‌های انجام شده بر اساس نسبت قطر، نسبت سطح، نسبت دما و هندسه نازل اولیه مختلف صورت گرفته است.

تای^۱ و همکارش [۵] به بهینه‌سازی اجکتور در زمینه افزایش نیروی پرتاب محوری پرداختند. در این تحقیق برای طراحی اجکتور با ابعاد کوچک و فشرده جهت تولید نیروی محرکه صندلی ۷ شکل و یا در سیستم‌های کنترل سرعت عکس‌عملی، روش عددی توسعه داده شد. جهت بهینه کردن منحنی‌های دیفیوزر و هندسه محفظه اختلاط برای افزایش نیروی پرتاب محوری در اجکتور، یک روش تغییرپذیر با روش تفاضل محدود با هم ترکیب شده‌اند. در یک جریان اولیه داده شده، بهینه‌سازی بر روی اجکتور را می‌توان با در نظر گرفتن دو شرایط انجام داد:

- کوچک‌ترین طول اجکتور
- بیشترین فشار پرتاب

نتایج نشان داده است که با استفاده از این روش بهینه‌سازی می‌توان نیروی پرتاب را حدود ۳۸ درصد افزایش داد و در ابعاد طولی اجکتور را به میزان ۶ درصد کاهش داد. پرت^۲ و همکارش [۶] به بررسی تئوری اجکتور پرداختند. در این پژوهش ملاحظات اساسی مربوط به طراحی اجکتورها و پدیده‌های فیزیکی مرتبط با آنها بررسی شدند. همچنین معادلات مربوط به اجکتور مانند رابطه نسبت فشار جریان اولیه به ثانویه در تحقیق آنها ارائه شده است.

رون^۳ [۷] به بررسی ضریب همبستگی^۴ عملکرد اجکتور پرداخت. در این تحقیق بر اساس عملکرد اجکتور با سیال‌های عامل مختلف و در شرایط کاری متفاوت، ضریب همبستگی استخراج شد. این ضرایب برگرفته از میزان اثربخشی انتقال مومنتم از سیال اولیه به سیال ثانویه بود. مروری بر نتایج تست منتشر شده تأییدکننده ضریب همبستگی عملکرد اجکتور استخراج شده است.

واگنرو^۵ و همکارش [۸] جریان هوای اجکتور با نازل مافوق صوت از نوع حلقوی را بررسی کردند. همچنین در این

1-Tai

2-Porter

3-Roan

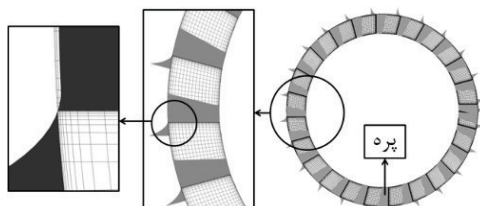
4-Correlation Factor

5-Wagnerova

شده است. همچنین در شکل ۳ شبکه با سازمان در محدوده میان پره‌ها نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات شبکه تولیدشده.

تعداد المان‌های شبکه	ارتفاع اولین سلول لایه مرزی بر حسب mm	شبکه لایه مرزی	نوع شبکه
۵۴۵۵۵۹۰	۰/۵	دارد	با سازمان



شکل (۳): شبکه با سازمان در محدوده میان پره‌ها در نازل تزریق موجود.

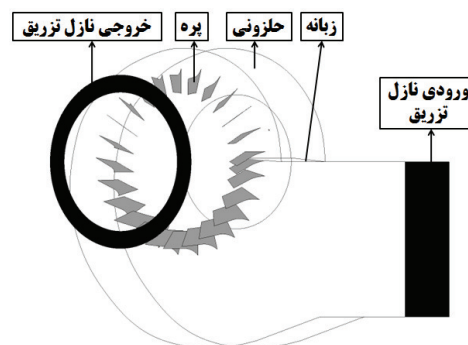
حل عددی جریان درون نازل تزریق در نرم‌افزار ANSYS CFX با استفاده از روش اجزاء محدود مبتنی بر حجم محدود^[۱۲] انجام می‌شود. در این نرم‌افزار، نتایج و خصوصیات سیال بر روی گره‌های سلول‌ها ذخیره می‌گردد و جهت افزایش دقت نتایج از توابع شکل^۲ استفاده شده است. حل به صورت سه‌بعدی، تراکم‌پذیر و لزج صورت می‌گیرد. جهت حل معادلات، روش فشار پایه با دقت مجزاسازی بالا^۳ به کار رفته است. روش فشار پایه در اعداد ماخ پایین نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهند و همچنین نرم‌افزار ANSYS CFX تنها بر مبنای این روش پایه‌ریزی شده است.

عدد رینولدز جریان ورودی بر اساس قطر هیدرولیکی برابر با مقدار $74/4 \times 10^6$ خواهد شد. از طرفی جریان‌های با عدد رینولدز بالاتر از ۲۰۰۰ یا ۴۰۰۰ درون لوله‌ها و کانال‌ها به عنوان جریان آشفته در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس جریان درون حلزونی نیز از نوع آشفته خواهد بود. برای این منظور جهت حل عددی از مدل آشفتگی SST K- ω استفاده خواهد شد که در آن قابلیت‌های بالای مدل K- ω در تسخیر نمودن فیزیک حاکم بر نواحی نزدیک دیواره (با عدد رینولدز پایین) با قابلیت‌های بالای مدل K- ϵ در نواحی دور از دیواره (با عدد رینولدز بالا) به کار گرفته شده است. همچنین در این نرم‌افزار مدل آشفتگی SST K- ω با یک تابع دیواره اتوماتیک [۱۲]

آن می‌باشد. در ادامه جهت رفع این نقیصه و بهینه‌سازی تونل‌باد، ابتدا دانش فنی لازم جهت طراحی نازل تزریق اجکتور ارائه می‌شود و بر این اساس نازل تزریق جدیدی برای جایگزین کردن با نمونه موجود طراحی خواهد شد. در انتها با استفاده از تحلیل عددی عملکرد نازل تزریق جدید نسبت به نازل تزریق موجود مقایسه می‌گردد.

۲- مشخصات هندسی نازل تزریق موجود در اجکتور یک تونل‌باد

در شکل ۱ اجکتور با نازل تزریق از نوع شعاعی نشان داده شد. حلزونی، نازل و پره اجزاء نازل تزریق شعاعی در تونل‌باد را تشکیل می‌دهند. هندسه نازل تزریق موجود در یک تونل‌باد در شکل ۲ نشان داده شده است. حلزونی، سیال اولیه پراثری را که توسط موتور توربوجت تولید شده است دریافت نموده و سپس به صورت توزیعی از جریان حلقوی با سرعت یکنواخت به سمت نازل و پره‌ها هدایت می‌کند. نازل به سیال خارج شده از حلزونی سرعت می‌بخشد و پره‌ها جریان خروجی از حلزونی را در راستای جریان تونل‌باد قرار می‌دهد.



شکل (۲): هندسه نازل تزریق موجود در اجکتور یک تونل‌باد.

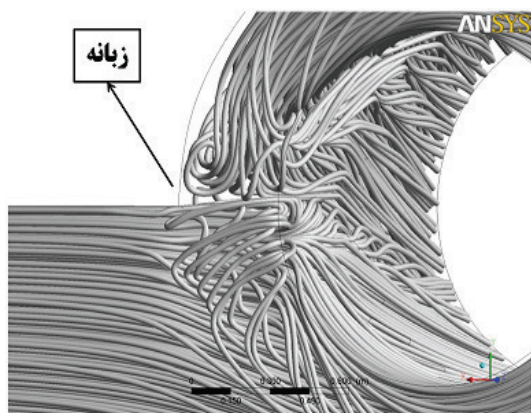
۳- بررسی عملکرد نازل تزریق موجود در اجکتور یک تونل‌باد با استفاده از تحلیل عددی سه‌بعدی جریان

جهت بررسی عملکرد نازل تزریق موجود (شکل ۲) می‌توان از تحلیل عددی سه‌بعدی کمک گرفت. برای این منظور جهت تولید هندسه و شبکه از نرم‌افزار گمبیت استفاده می‌شود. انتخاب نوع شبکه بر روی نتایج حاصل از تحلیل عددی بسیار مؤثر است، بنابراین در اینجا شبکه با سازمان به همراه شبکه‌بندی لایه‌مرزی جهت حل دقیق‌تر مسئله به کار رفته است. ارتفاع اولین سلول در نزدیکی دیواره به گونه‌ای در نظر گرفته شده است تا مقدار y^+ در حد مجاز قرار گیرد. مشخصات شبکه تولید شده در جدول ۱ آورده

1-Finite Element-Based Finite Volume Method

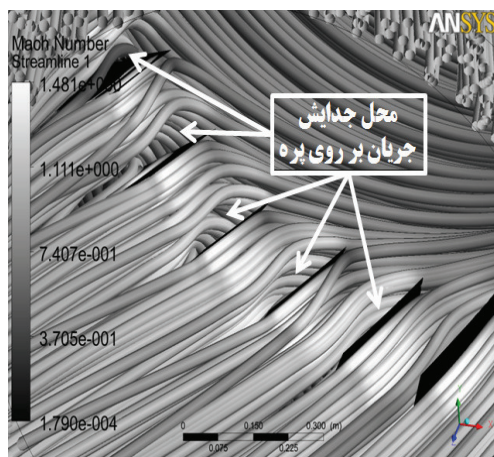
2-Shape Functions

3-High Resolution (Second Order Upwind)



شکل (۴): خطوط جریان نمایش‌دهنده آشفتگی جریان در موقعیت زبانه حلزونی در نازل تزریق موجود.

بر اساس شکل ۵ به دلیل نامناسب بودن زاویه پرها نسبت به جریان خروجی از حلزونی، جدایش جریان بر روی پرها اتفاق می‌افتد، از طرفی به دلیل طراحی نامناسب نازل اصلی اجکتور امکان جلوگیری از جدایش جریان با سرعت بخشیدن به سیال در این مقطع وجود ندارد، در نتیجه در حد فاصل میان پرها، جدایش جریان مانند یک نازل همگرا - واگرا عمل نموده و سرعت جریان تا عدد ماخ ۱/۴۸ بالا رفته و فشار استاتیکی پایین آمده است. از آنجا که جریان پایین دست دارای فشار استاتیکی بالاتری است در نتیجه پدیده شوک اتفاق افتاده و جریان با سرعت متوسط ۰/۹ برحسب عدد ماخ از درون میدان خارج می‌شود. در شکل ۶ کانتورهای ماخ ثابت برای عدد ماخ ۱ آورده شده است، همان‌گونه که دیده می‌شود وجود سطوح ماخ ثابت با عدد ماخ ۱ و بسته بودن این سطوح به شکل حجم، نشان‌دهنده وجود شوک در این نواحی است.



شکل (۵): خطوط جریان نمایش‌دهنده جدایش جریان بر روی پره‌های نازل تزریق موجود.

همراه شده است که در این حالت حداکثر Y^+ مجاز برابر با ۳۰۰ می‌باشد. از آنجا که میزان شدت آشفتگی جریان ورودی به حلزونی مشخص نیست، در نرم‌افزار ANSYS CFX [۱۳] برای چنین حالتی، انتخاب گزینه آشفتگی متوسط^۱ پیشنهاد شده است. تنظیمات مربوط به این حالت از شدت آشفتگی عبارت است از:

$$\text{Intensity}=5\%$$

$$\frac{\mu_t}{\mu} = 10 \quad (1)$$

برای تحلیل عددی جریان درون نازل تزریق اجکتور از نرم‌افزار ANSYS CFX استفاده می‌شود. حل به صورت سه‌بعدی، تراکم‌پذیر و لزج صورت می‌گیرد. جهت حل معادلات، روش فشار پایه با دقت مجزاسازی High Resolution و مدل آشفتگی SST K- ω به کار رفته است. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای تحلیل عددی عبارت است از:

الف) شرط مرزی ورودی:

$$P_0=1.21 \text{ bar}$$

$$T=483 \text{ K}$$

ب) شرط مرزی خروجی: برابر با فشار استاتیکی معادل عدد ماخ ۱ در نظر گرفته می‌شود.

$$P=0.64 \text{ bar}$$

نتایج حاصل از حل عددی جریان سیال در جدول ۲ آمده است.

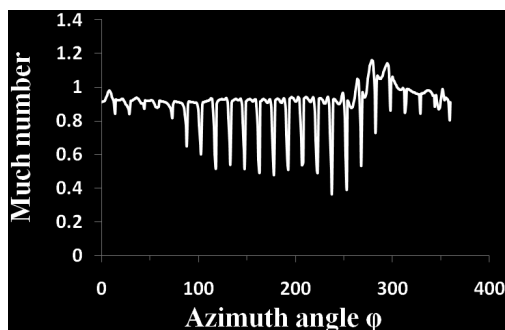
جدول (۲): نتایج تحلیل عددی بر روی نازل تزریق موجود.

۰/۳۹۶	سرعت متوسط جریان ورودی برحسب عدد ماخ
۰/۹۰۲	سرعت متوسط جریان خروجی برحسب عدد ماخ
۱۴۶/۹۷۰ (kg/s)	شدت جریان جرمی
۰/۹۳/۲	بازده برحسب نسبت فشار کل خروجی به ورودی

در شکل ۴ خطوط جریان برحسب سرعت در انتهای حلزونی در موقعیت زبانه آورده شده است. عامل بروز آشفتگی در این ناحیه دو اشکال موجود در طراحی حلزونی است:

- عدم مماس بودن جریان و برخورد سیال با استوانه داخلی نازل تزریق در ابتدای ورود به حلزونی.
- بسته بودن انتهای حلزونی در موقعیت زبانه و ناهمگن شدن جریان در دوسوی این محل.

¹ Medium intensity



(ج)

شکل ۷-الف): نمودار توزیع عدد ماخ در خروجی حلزونی و ورودی پره‌ها، (ب): نمودار توزیع عدد ماخ در حدفاصل ورودی تا خروجی پره‌ها، (ج): نمودار توزیع عدد ماخ در خروجی پره‌ها برحسب زاویه محیطی در نازل تزریق موجود.

۴- بهینه‌سازی عملکرد تونل باد

در تونل باد مذکور از اجکتور به منظور مکش جریان سیال درون محفظه آزمون استفاده شده است، بنابراین بالا بردن بازده اجکتور نقش مؤثری در افزایش بازده تونل باد و بالا بردن سرعت جریان در محفظه آزمون خواهد داشت. برای انجام این امر وجود نازل تزریقی با ویژگی‌های زیر الزامی است:

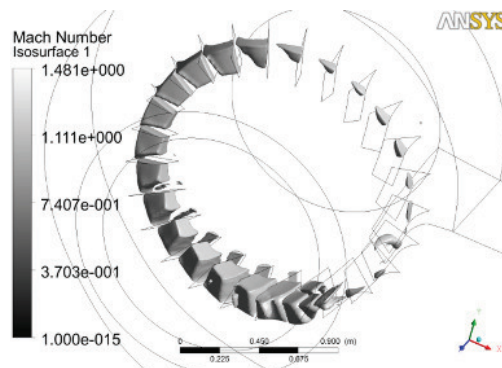
- توزیع یکنواخت جریان خروجی از نازل تزریق
- جلوگیری از اتلاف انرژی و افزایش بازده نازل تزریق با پیشگیری از وقوع پدیده شوک

جهت طراحی مجدد و بهینه نازل تزریق اجکتور، دستیابی به دانش فنی در این زمینه ضروری است. مباحثی که در این پژوهش استفاده شده است عبارت است از:

- مباحث مربوط به توربو ماشین‌ها جهت طراحی حلزونی
- مباحث مربوط به روش طراحی معکوس جهت طراحی نازل و پره‌ها

در روند طراحی اجکتور تونل باد، ابتدا محفظه اختلاط و سپس بر اساس آن نازل تزریق طراحی می‌گردد. در نتیجه اطلاعات هندسی محفظه اختلاط و نازل تزریق موجود، مبنای طراحی نازل تزریق جدید خواهد بود که در جدول ۳ آورده شده است. **جدول (۳):** اطلاعات موردنیاز جهت طراحی نازل تزریق جدید.

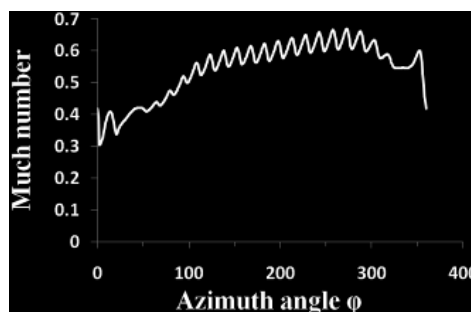
اندازه	اطلاعات
۰/۶۶۴۵(m)	شعاع داخلی نازل تزریق
۰/۸۳۰(m)	شعاع خارجی نازل تزریق
۱	سرعت جریان خروجی از نازل تزریق برحسب عدد ماخ



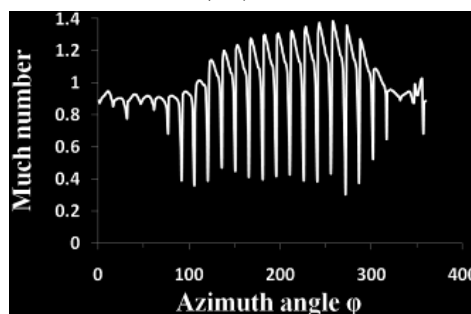
شکل (۶): کانتور سطوح ماخ ثابت با عدد ماخ ۱ در نازل تزریق موجود

در شکل ۷ توزیع عدد ماخ در سه ناحیه از نازل تزریق موجود نشان داده شده است که عبارتند از: الف) خروجی حلزونی و ورودی نازل و پره ب) حدفاصل ورودی تا خروجی نازل و پره ج) خروجی نازل و پره نمودارهای جریان نشان داده شده در شکل اخیر نشان‌دهنده موارد زیر است:

- غیریکنواخت بودن جریان خروجی از حلزونی
- نوسانات شدید عدد ماخ در مقاطع مختلف به دلیل جدایش جریان بر روی پره‌ها
- غیریکنواخت بودن جریان خروجی از نازل و پره‌ها



(الف)



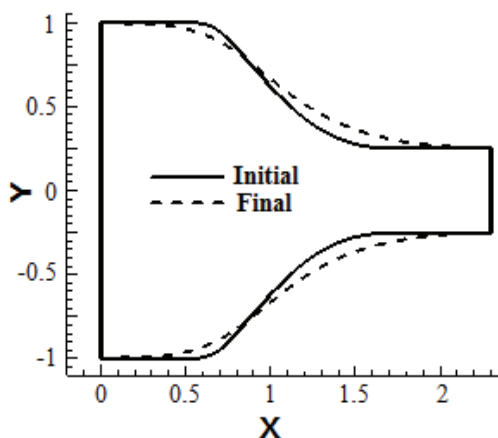
(ب)

۵- مراحل طراحی نازل تزریق

- مراحل طراحی نازل تزریق به ترتیب عبارت است از:
- طراحی مقطع نصف‌النهاری نازل با انحنای ۹۰ درجه به روش طراحی معکوس.
- طراحی پره دوبعدی به روش طراحی معکوس.
- طراحی نازل سه‌بعدی حاصل از ترکیب نازل و پره دوبعدی.
- طراحی حلزونی بر اساس ابعاد هندسی دهانه ورودی نازل سه‌بعدی.
- طراحی نازل تزریق جدید حاصل از ترکیب نازل سه‌بعدی و حلزونی و تحلیل عددی آن در نرم‌افزار ANSYS CFX.
- مقایسه نتایج حاصل از حل عددی در نازل تزریق جدید و نازل تزریق موجود.

۶- روش طراحی معکوس

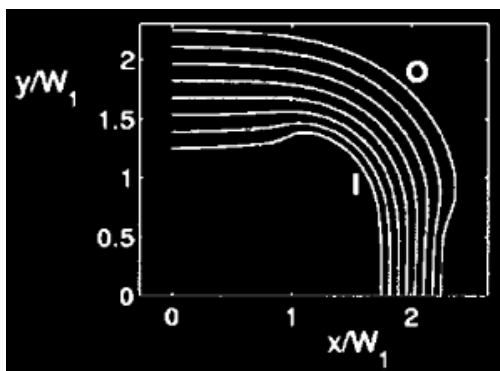
یکی از روش‌های طراحی آیرودینامیکی، روش طراحی معکوس می‌باشد [۱۳]. در این‌گونه مسائل، هندسه دیواره‌ها مجهول و توزیع فشار در راستای آنها معلوم است. در این روش، دیواره‌های مجهول تحت الگوریتمی از یک حدس اولیه تا رسیدن به هندسه نهایی و متناظر با توزیع فشار هدف تغییر شکل می‌دهند (شکل ۸). اختلاف توزیع فشار هدف و توزیع فشار موجود در هر مرحله از محاسبات عامل تغییر شکل دیواره‌ها می‌باشد که با نزدیک شدن به توزیع فشار هدف این اختلاف فشار به صفر نزدیک شده و باعث توقف حرکت دیواره‌ها می‌گردد. در هر مرحله از تغییر شکل دیواره‌ها، تحلیل عددی جریان داخلی برای محاسبه توزیع فشار موجود صورت می‌پذیرد.



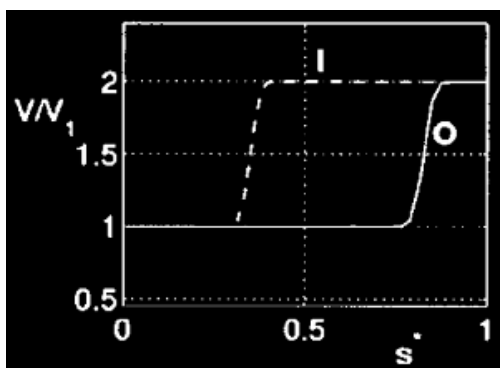
شکل (۸): حدس اولیه و هندسه نهایی طراحی شده به روش طراحی معکوس [۱۳].

۷- انتخاب مقطع نصف‌النهاری نازل با انحنای ۹۰ درجه

در گام نخست مقطع نصف‌النهاری نازل همگرا مادون صوت با انحنای ۹۰ درجه [۱۴] که با استفاده از روش طراحی معکوس طراحی شده است جهت استفاده در نازل تزریق جدید انتخاب می‌شود. مقطع نصف‌النهاری نازل در شکل ۹ و توزیع سرعت بر روی دیواره‌های آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این نازل نسبت $\frac{A}{A^*} = 2.093$ است که می‌تواند جریانی با حداقل عدد ماخ ۰/۳ در ورودی را به ماخ ۱ در خروجی برساند.



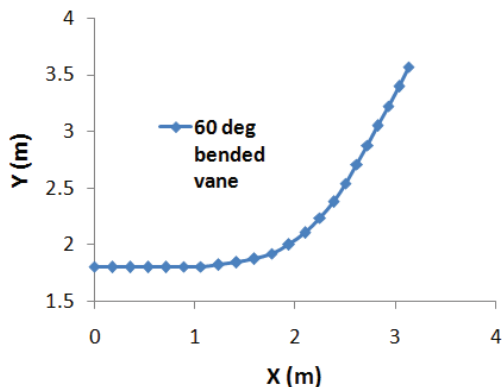
شکل (۹): مقطع نصف‌النهاری نازل [۱۴].



شکل (۱۰): توزیع سرعت بر روی دیواره‌های نازل [۱۴].

۸- طراحی پره دوبعدی

ایده ابتکاری بکار رفته در این قسمت آن است که می‌توان با مقیاس کردن و یا نگاشت در منحنی‌های آیرودینامیکی که از پیش طراحی شده است، برای سایر موارد مشابه نیز استفاده کرد. در ابتدا مقطع نصف‌النهاری دیفیوزر با انحنای ۹۰ درجه [۱۵] (شکل ۱۱) که با استفاده از روش طراحی معکوس و انتخاب توزیع فشار مناسب (شکل ۱۲) طراحی شده است جهت طراحی پره انتخاب می‌شود. در ادامه با گذراندن خط متوسط از میان دو دیواره دیفیوزر، پره‌ای دوبعدی با انحنای ۹۰ درجه ایجاد می‌گردد (شکل ۱۳). از طرفی زاویه انحنای پره، باید با

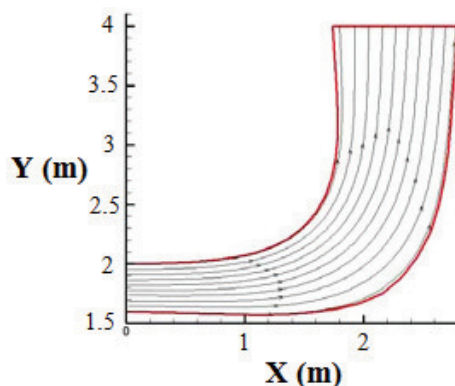


شکل (۱۴): پره دوبعدی با انحنای ۶۰ درجه.

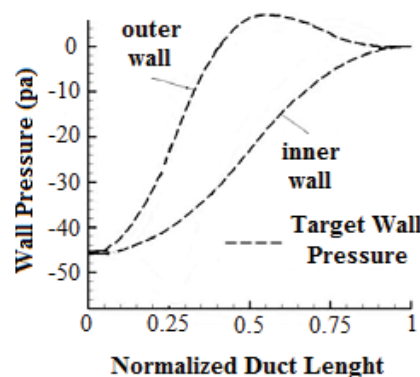
۹- طراحی نازل و پره سه بعدی حاصل از ترکیب نازل و پره دوبعدی

همان گونه که گفته شد در این پژوهش، هدف از طراحی نازل تزریق جدید، بهینه سازی تونل باد بدون تغییر در سایر اجزاء تونل است، بنابراین ابعاد هندسی خروجی نازل تزریق جدید باید دقیقاً مطابق با نمونه موجود و قدیمی آن بر اساس جدول ۱ باشد. در نتیجه برای ایجاد نازل و پره سه بعدی، ابتدا نازل دوبعدی در صفحه XY مطابق شکل ۱۵ به گونه ای ترسیم و مقیاس می گردد تا موقعیت و اندازه دهانه خروجی آن برابر با تفاضل شعاع خارجی و شعاع داخلی نازل تزریق موجود ارائه شده در جدول ۱ باشد که مقدار آن مساوی با $۱۶۵/۵$ میلی متر است. در ادامه، نازل دوبعدی به شعاع داخلی $۶۶۴/۵$ میلی متر حول محور X دوران داده می شود. سپس پره دوبعدی در صفحه YZ به اندازه ای مقیاس می گردد که به طور کامل درون نازل قرار گیرد. چنانچه پرها با اختلاف زاویه ۱۵ درجه نسبت به یکدیگر حول محور X تکرار گردد، در مجموع تعداد پرها ۲۴ عدد خواهد شد. هندسه نازل و پره سه بعدی به همراه موقعیت قرارگیری پرها به صورت سه بعدی در شکل ۱۵ نشان داده شده است. نازل و پره سه بعدی طراحی شده دارای نسبت سطح ورودی به خروجی ($\frac{A_1}{A_2}$) برابر با $۳/۱۲$ است. (در اینجا اندیس ۱ معرف ورودی نازل و اندیس ۲ بیانگر خروجی نازل است)، و این مقدار بدین معنی است که نازل و پره سه بعدی قادر است تا جریان با حداقل عدد ماخ $۰/۴۱$ در ورودی را به عدد ماخ ۱ در خروجی برساند.

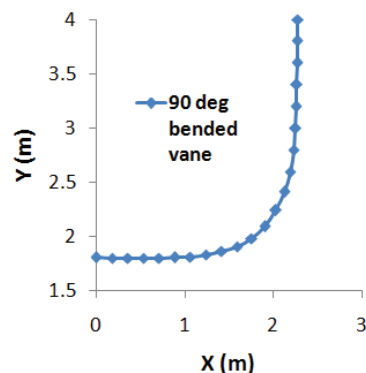
زاویه جریان خروجی از حلزونی برابر باشد، تا بتواند مؤلفه مماسی جریان خروجی از حلزونی را با تغییر جهت، به مؤلفه شعاعی تبدیل کند. در طراحی حلزونی، زاویه ۶۰ درجه عدد مناسبی برای زاویه جریان خروجی است، بنابراین زاویه انحنای پره نیز ۶۰ درجه انتخاب می شود. با استفاده از نگاشت مختصات نقاط پره ۹۰ درجه، پره ۶۰ درجه با همان ویژگی های قبلی بدست خواهد آمد (شکل ۱۴).



شکل (۱۱): مقطع نصف النهاری دیفیوزر با انحنای ۹۰ درجه [۱۵].



شکل (۱۲): پروفیل توزیع فشار بر روی دیواره های مقطع نصف النهاری دیفیوزر با انحنای ۹۰ درجه [۱۵].

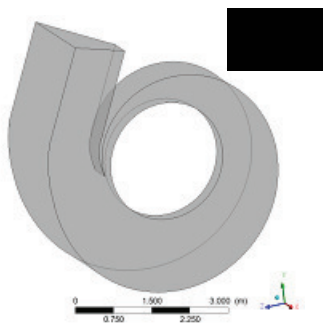


شکل (۱۳): پره دوبعدی با انحنای ۹۰ درجه

مشخصات اولیه موردنیاز جهت طراحی حلزونی، مطابق با اطلاعات موجود در جدول ۴ و برگرفته از ابعاد هندسی دهانه ورودی مجموعه نازل و پره سه‌بعدی طراحی شده در مرحله قبل است. هندسه حلزونی طراحی شده در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

جدول (۴): مشخصات اولیه موردنیاز جهت طراحی حلزونی.

مشخصات	اندازه
مساحت خروجی حلزونی	$2/424(m^2)$
سرعت جریان خروجی برحسب عدد ماخ	۰/۵
زاویه جریان خروجی از حلزونی	60°



شکل (۱۷): هندسه حلزونی طراحی شده.

۱۱- طراحی نازل تزریق جدید و تحلیل عددی آن

جهت طراحی نازل تزریق جدید، نازل سه‌بعدی و حلزونی طراحی شده در بخش‌های ۹ و ۱۰ به یکدیگر متصل می‌شود. هندسه نازل تزریق جدید در شکل ۱۸ نشان داده شده است.

به‌منظور بررسی عملکرد نازل تزریق جدید، تحلیل عددی سه‌بعدی بر روی آن صورت خواهد گرفت. جهت تولید هندسه و شبکه از نرم‌افزار گمبیت استفاده می‌شود. برای بالا بردن دقت نتایج حاصل از حل عددی، شبکه با سازمان به همراه شبکه‌بندی لایه‌مرزی بکار رفته است. ویژگی‌های شبکه تولید شده و شرایط تحلیل عددی بر روی نازل تزریق جدید، مشابه با نازل تزریق موجود در نظر گرفته می‌شود. مشخصات شبکه تولید شده در جدول ۵ آورده شده است.



شکل (۱۵): نمای داخلی هندسه نازل سه‌بعدی طراحی شده.

۱۰- طراحی حلزونی بر اساس ابعاد هندسی دهانه ورودی نازل سه‌بعدی

این مرحله شامل طراحی حلزونی مناسبی است که علاوه بر تأمین سرعت و زاویه جریان موردنیاز نازل و پره‌ها، دارای مساحت خروجی برابر با مساحت ورودی نازل سه‌بعدی باشد. هدف اصلی در این روش طراحی، استخراج ابعاد اولیه حلزونی، با فرض جریان تراکم‌پذیر، لزوج و یک‌بعدی با استفاده از معادلات پیوستگی و مومنتم است. برای طراحی حلزونی از روش‌های ارائه شده در مباحث توربومشین استفاده می‌گردد. روش موجود در مرجع [۱۶] بسیار کاربردی و بهینه بوده و در آن توزیع جریان خروجی از حلزونی از لحاظ سرعت و زاویه جریان یکنواخت می‌باشد. هدف اصلی در این روش طراحی، استخراج ابعاد کلی هندسه حلزونی، با فرض جریان تراکم‌پذیر یک‌بعدی است که در آن جریان درون حلزونی به صورت گردابه آزاد در نظر گرفته می‌شود. سه مرحله اصلی در این روش عبارت است از:

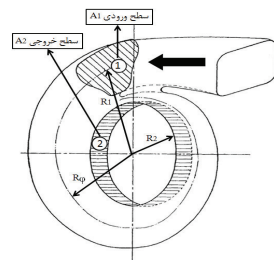
(۱) در مرحله اول، اندازه کلی حلزونی در حالت هندسه بی‌بعد، به صورت نسبت () و نسبت () بدست می‌آید (شکل ۱۶)،

(۲) در دومین مرحله، شکل مسیر جریان چرخشی حلزونی

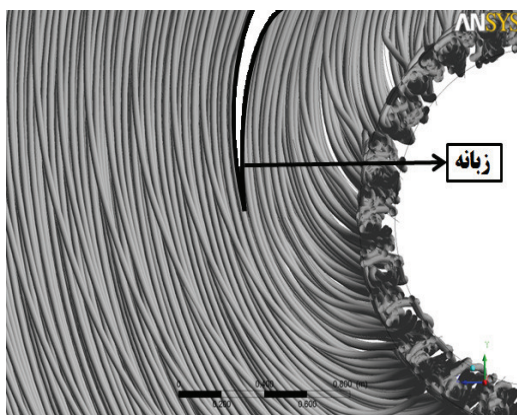
به صورت $(\frac{R_\phi}{R_1})$ و تغییر سطح مقطع عبوری به صورت $(\frac{A_\phi}{A_1})$

و برحسب زاویه محیطی محاسبه می‌گردد،

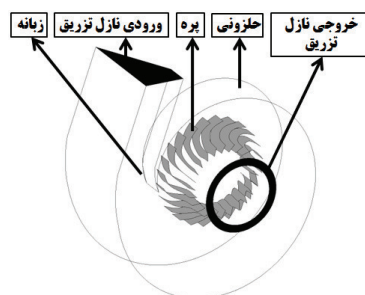
(۳) در آخرین مرحله، شکل مقطع عبوری کانال و شعاع دیواره بیرونی حلزونی و ابعاد اولیه حلزونی مشخص می‌شود.



شکل (۱۶): هندسه حلزونی طراحی شده.



شکل ۱۹: خطوط جریان در ناحیه زبانه در نازل تزریق جدید.



شکل ۱۸: هندسه نازل تزریق جدید.

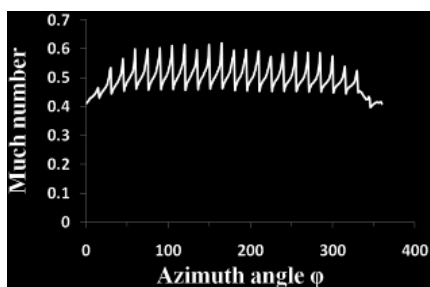
جدول (۵): مشخصات شبکه تولیدشده.

نوع شبکه	لایه مرزی	ارتفاع اولین سلول لایه مرزی برحسب mm	تعداد المان‌های موجود در میدان حل
با سازمان	دارد	۰/۵	۵۳۵۳۶۶۴

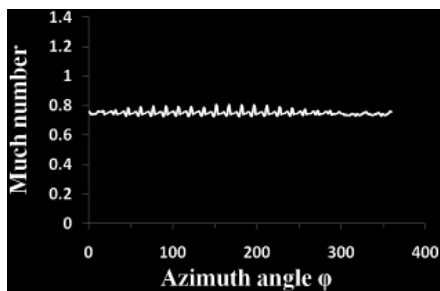
همان‌گونه که در شکل ۱۹ دیده می‌شود در ناحیه زبانه از نازل تزریق جدید، هیچ‌گونه آشفتگی و به هم ریختگی جریان دیده نمی‌شود در حالی که جریان در نازل تزریق موجود در شکل ۴ در این ناحیه بسیار آشفته بود. در شکل ۲۰ توزیع عدد ماخ در سه ناحیه از نازل تزریق جدید نشان داده شده است که عبارت است از:

- خروجی حلزونی و ورودی نازل و پره سه بعدی
- حدفاصل ورودی تا خروجی نازل و پره سه بعدی
- خروجی نازل و پره سه بعدی

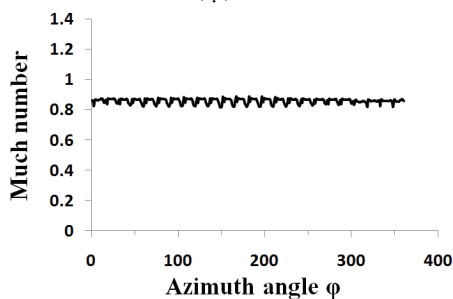
جریان پس از خروج از حلزونی به درون نازل و پره سه بعدی هدایت می‌شود بنابراین در ابتدای مواجهه جریان با پره‌ها، کمی تغییر سرعت به جهت تطابق جریان با شرایط جدید امری طبیعی است. نمودار نشان داده شده در شکل ۲۰-الف بیانگر این موضوع است. با ادامه حرکت جریان درون کانال نازل و پره سه بعدی، نوسانات سرعت مطابق شکل ۲۰-ب و ۲۰-ج به اندازه‌ای کاهش می‌یابد که این نوسانات قابل صرفه نظر کردن است. در شکل ۷ در نازل تزریق اجکتور موجود، نوسانات شدید در تمامی نمودارها قابل مشاهده است. از مقایسه نمودارهای نشان داده شده در شکل ۷ و شکل ۲۰، برتری روش طراحی ارائه شده در نازل تزریق جدید کاملاً مشهود است. سایر نتایج حاصل از حل عددی جریان در جدول ۶ آمده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲۰-الف): نمودار توزیع عدد ماخ در خروجی حلزونی و ورودی نازل و پره سه بعدی، (ب): نمودار توزیع عدد ماخ در حدفاصل ورودی تا خروجی نازل و پره سه بعدی، (ج): نمودار توزیع عدد ماخ در خروجی نازل و پره سه بعدی برحسب زاویه محیطی در نازل تزریق جدید.

جدول (۶): نتایج تحلیل عددی بر روی نازل تزریق جدید.

۰/۲۳	سرعت متوسط جریان ورودی بر حسب عدد ماخ
۰/۹۲	سرعت متوسط جریان خروجی از میدان محاسباتی بر حسب عدد ماخ
۱۶۰/۳۱۴(kg/s)	دبی
%۹۵/۲	بازده بر حسب نسبت فشار کل خروجی به ورودی

۱۲- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از حل عددی در نازل تزریق جدید و نازل تزریق موجود بر روی تونل‌باد مافوق صوت در جدول ۷ آمده است.

جدول ۷- نتایج تحلیل عددی بر روی نازل‌های تزریق جدید و

موجود

موجود	جدید	
۰/۹۰۲	۰/۹۲۲	سرعت متوسط جریان خروجی بر حسب عدد ماخ
۱۴۶/۹۷۰(kg/s)	۱۶۰/۳۱۴(kg/s)	شدت جریان جرمی
%۹۳/۱	%۹۵/۲	بازده

مقایسه کلی میان دو نازل تزریق موجود و جدید عبارت است از:

- در نازل تزریق موجود به دلیل طراحی نامناسب نازل و پره‌ها و عدم انطباق زاویه پره‌ها با زاویه جریان خروجی از حلزونی، بر روی پره‌ها جدایش جریان و شوک تشکیل شده که موجب افزایش تلفات و کاهش بازده می‌گردد. این مسئله در نازل تزریق جدید با توجه به طراحی مناسب حلزونی، نازل و پره مشاهده نمی‌شود.

- همان‌گونه که در نمودارها دیده شد، توزیع عدد ماخ در خروجی نازل تزریق جدید، نسبت به نازل تزریق موجود، حالت یکنواخت‌تری دارد، این امر به دلیل طراحی و عملکرد بهتر حلزونی جدید است.

- در نازل تزریق جدید، دبی به میزان ۸/۳٪ و بازده بر حسب نسبت فشار کل خروجی به ورودی به میزان ۲/۱٪ بیشتر از نازل تزریق موجود است، درحالی که هر دو از نظر ابعاد هندسی در قسمت خروجی، برابر هستند.

- از آنجا که سیال خروجی از نازل تزریق، وارد محفظه اختلاط اجکتور می‌شود بنابراین یکنواختی جریان با حداکثر دبی، کمترین افت فشاری و بالاترین بازده در خروجی نازل تزریق می‌تواند منجر به اختلاط بهتر و مکش

میزان بیشتری از سیال ثانویه در نازل خلأ و محفظه آزمون گردد. برای تعیین میزان بهبود عملکرد اجکتور تونل باد با در نظر گرفتن نازل تزریق جدید نیاز به انجام شبیه‌سازی‌های گسترده‌تری در این زمینه با در نظر گرفتن کلیه اجزاء اجکتور و تونل باد است که خود دارای شرح و تفصیل بسیار بوده و انجام و بررسی آن فراتر از حجم این مقاله می‌باشد.

- عملکرد بهتر نازل تزریق جدید نسبت به نازل تزریق موجود بیانگر برتری روش طراحی گفته‌شده در این مقاله و استفاده از روش طراحی معکوس در طراحی اجزاء آیرودینامیکی از قبیل نازل و پره است.

- در این پژوهش علاوه بر کسب دانش فنی لازم جهت طراحی نازل تزریق اجکتور، همچنین نازل تزریق جدید عملکرد بهتری نسبت به نازل تزریق موجود دارد.

۱۳- مراجع

1. Tizro, E. "Design of supersonic ejectors", Thesis requirement for the degree of bachelor of science in mechanical engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran, 2001.
2. Chow, W.L., and Addy, A.L. "Interaction between primary and secondary streams of supersonic ejector systems and their performance characteristics", AIAA J., Vol. 2, No. 4, pp. 686-695, 1964.
3. Chow, W.L., and Yeh, P.S. "characteristics of supersonic ejector systems with nonconstant area shroud", AIAA J., Vol. 3, No. 3, pp. 525-527, 1965.
4. Anderson, B.H. "Factors which influence the analysis and design of ejector nozzles", AIAA Paper 1972-46, 1972.
5. Tai, T.C., and Taylor, D.W. "Optimization of axisymmetric thrust-augmenting ejectors", AIAA Paper 1977-707, 1977.
6. Porter, J.L., and Squyers, R.A. "On the rational design of compressible flow ejectors", AIAA Paper 1981-1678, 1981.
7. Roan, V.P. "An ejector performance correlation factor", AIAA Paper 1991-2545, 1991.
8. Wagnerova, E., and Imris, I. "Air Flow Through an ejector with annular supersonic nozzle", J. Comp. Appl. Mech., Vol. 2, No.1, pp. 157-160, 2001.
9. Watanawanavet, S. "Optimization of a high-efficiency jet ejector by computational fluid dynamics software", Thesis requirement for the degree of master of science in mechanical engineering, University of Texas A&M, Texas, USA, 2005.
10. Ahmadzadegan, A., Haqiri, A., and Mani, M. "Numerical study of the effect of swirl and mixing length on the performance of ejectors", 17th annual conference of the CFD society, Canada, 2009.
11. Nili-Ahmadabadi, M., Roshani, M., and Rabie, A. "One Dimensional Design of Single, Two and