

شبیه‌سازی عددی کنترل بردار رانش در نازل‌های همگرا-واگرا از دیدگاه انرژی و آنتروپی

مجتبی محمدحسن زاده

دانشجوی کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران،
mojtabahassanzade.1376@gmail.com

مهدی هاشم‌آبادی*

استادیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، hashemabadi@mut.ac.ir

جاماسب پیرکندی

دانشیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، hashemabadi@mut.ac.ir

چکیده

تولید آنتروپی یک پارامتر کلیدی برای تعیین عوامل محدودکننده عملکردی در بسیاری از سیستم‌های مهندسی است. در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی و تحلیل تزریق ثانویه سیال در نازل که برای کنترل بردار رانش استفاده می‌شود، از دیدگاه آنتروپی و انرژی انجام شده است. محاسبات مربوط به تولید آنتروپی و انرژی تخریبی با استفاده از کدنویسی انجام شده است. تزریق سیال ثانویه در نازل سبب تغییر زاویه بردار رانش می‌شود. پارامترهایی همچون فشار ورودی، دبی تزریق، موقعیت تزریق و زاویه تزریق از مهم‌ترین پارامترهای تغییر زاویه بردار رانش هستند. در این مقاله، حل به صورت دوبعدی و سه‌بعدی انجام شده است. در حل دوبعدی، فاصله قرارگیری محل تزریق نسبت به طول بخش واگرا در نسبت‌های $0/6$ و $0/8$ علاوه بر شوک مایل، دارای شوک جدایش نیز می‌باشند و در موقعیت تزریق $0/8$ ، این شوک‌ها از قدرت بیشتری برخوردار هستند. در موقعیت تزریق $0/3$ و دبی تزریق $2/3$ ، شوک مایل به دیواره مقابل نازل برخورد کرده است. بهینه‌ترین زاویه تزریق، زاویه 120° ، به دلیل بیشترین انحراف انتخاب شد. در حل سه‌بعدی، تزریق $6/6$ بیشترین مقدار انحراف بردار رانش را که برابر با $8/23^\circ$ درجه می‌باشد، نشان می‌دهد. تغییر دو پارامتر آنتروپی تولیدی و انرژی تخریبی نشان می‌دهد که با تولید آنتروپی بیشتر، پایداری کاهش یافته و تخریب انرژی افزایش می‌یابد. بعد از محل تزریق آنتروپی بسیار افزایش می‌یابد که در مراحل طراحی و ساخت نازل باید مدنظر قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تولید آنتروپی، انرژی، کنترل بردار رانش، تزریق سیال ثانویه، انعکاس شوک، نازل.

Numerical simulation of thrust vector control in converging-diverging nozzles from the point of view of exergy and entropy

M. Mahamad Hassanzade
M. Hashemabadi
J. Pirkandi

Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
Faculty of Aerospace, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
Faculty of Aerospace, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Entropy generation is a key parameter to determine performance limiting factors in many engineering systems. In this research, the simulation and analysis of the secondary injection in the nozzle, which is used to control the thrust vector, has been done from the perspective of entropy and exergy. Calculations related to local entropy and destructive exergy have been done by coding user-defined functions. In the secondary injection method in the nozzle, the shock created causes the angle of the thrust vector to change. Parameters such as inlet pressure, injection flow rate, injection position, and injection angle are the most important parameters for changing the thrust vector angle. In this article, the solution is done in 2D and 3D. In the 2D solution, the distance of the injection position compared to the length of the divergent part in the ratios of 0.6 and 0.8, in addition to the oblique shock, also has a separation shock, and in the injection position of 0.8, these shocks are of strength have more. At the injection position of 0.3 and the injection flow rate of 3%, the oblique shock has hit the opposite wall of the nozzle. The most optimal injection angle, 120, was chosen due to the greatest deviation. In the 3D solution, the injection of 6.6% shows the highest amount of thrust vector angle, which is equal to 8.23 degrees. The change of two parameters of entropy production and destructive exergy shows that with more entropy production, stability decreases and exergy destruction increases. After the injection position, entropy increases a lot, which should be considered in the design and construction of the nozzle.

Keywords: Entropy generation, Exergy, Thrust vector control, Secondary fluid injection, Shock reflection, Nozzle.

۱- مقدمه

ترمودینامیک قانون اول ترمودینامیک با کمیت انرژی سروکار دارد و بیان می‌کند که انرژی نمی‌تواند خلق یا نابود شود در واقع فقط پایستاری انرژی را در هر فرآیند بیان می‌کند. قانون دوم ترمودینامیک با کیفیت انرژی و به خصوص با افت کیفیت انرژی (انرژی) در هر فرآیند، با تولید آنتروپی و فرصت‌های از دست رفته برای انجام کار مواجه است که امکان بهبود کیفیت را فراهم می‌آورد. قانون دوم ترمودینامیک وسیله با ارزشی برای بهینه‌سازی سیستم‌های پیچیده ترمودینامیکی است. در این میان آنتروپی را می‌توان به عنوان یک خاصیت مقداری تعیین کرد که وابسته به مسیر انجام فرایند نمی‌باشد. آنتروپی هیچ‌وقت از بین نمی‌رود و به طور کلی بر اساس اصل افزایش

تحلیل انرژی یک روش سنتی برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های صنعتی می‌باشد. به‌طور معمول این روش از موازنه انرژی استفاده کرده که بر پایه قانون اول ترمودینامیک بوده و با این روش بازده انرژی را محاسبه می‌کند. این موازنه برای تشخیص تلف شدن انرژی مثل تلف شدن گرما و گاهی اوقات تلفات و بازیابی گرما می‌باشد. تحلیل انرژی به طور واضح مکان از هم پاشیدگی انرژی در یک فرآیند یا فناوری را بیان می‌کند. تمایز بین انرژی و انرژی برای اجتناب از سردرگمی در تحلیل و طراحی سیستم گرمایی دارای اهمیت می‌باشد. در علم

آنتروپی، به دلیل وجود برگشت‌پذیری‌های متعدد در فرایندهای واقعی در طبیعت و صنعت، همیشه آنتروپی تولید می‌شود و به بیان دیگر بازدهی هیچ سیستمی صد درصد نیست. در واقع اصل افزایش آنتروپی امکان یا عدم امکان انجام یک فرایند ترمودینامیکی را بررسی می‌کند. از سوی دیگر، اگرزوی تعریفی خلاف تولید آنتروپی دارد به این منظور که اگرزوی قابلیت تولید ندارد و قابلیت نابود شدن و از بین رفتن را دارد. به طور کل، عامل برگشت‌ناپذیرها تولید آنتروپی می‌باشد و این به این معناست که هرگاه آنتروپی تولید شود، اگرزوی از بین می‌رود. در بحث اگرزوی مفهومی تحت عنوان حالت مرده برای ماده تعریف می‌شود. بر اساس این تعریف هرگاه ماده‌ای در شرایط دمایی صفر کلون قرار بگیرد عملاً هیچ انرژی درونی در آن وجود ندارد و مولکول‌های آن ماده هیچ نیروی جاذبه و یا دافعه‌ای به یکدیگر وارد نمی‌کنند، به این حالت از ماده حالت مرده می‌گویند. دنیای امروز بیش از آنکه با بحران انرژی مواجه باشد با بحران اگرزوی مواجه است چرا که بیش از دو سوم کره زمین از اقیانوس‌ها تشکیل شده است و دما این آب این اقیانوس‌ها در حدود صفر کلون نمی‌باشد فلذا در حالت مرده نیستند و در آن‌ها انرژی وجود دارد اما قابلیت تبدیل این انرژی به کار برای بشر مهیا نیست، نکته قابل توجه درباره آنتروپی و اگرزوی این است که برای هر دو آنها قانون بقا تعریف نمی‌شود چرا که آنتروپی همیشه در حال افزایش و اگرزوی همیشه در حال از بین رفتن است [۱].

از سویی در صنایع هوایی، کنترل یک پرنده در حین مسیر پروازی خود و تا رسیدن به هدف مورد نظر بدون هیچگونه انحرافی، یک اصل مهم به شمار می‌آید. سیستم‌های کنترل بردار رانش^۱، هر چند جزئی، اما در تمام وسایل پرنده طراحی و مورد استفاده قرار می‌گیرند که شامل بکارگیری روش‌های مختلفی همچون، روش‌های مکانیکی، آیرودینامیکی و کنترلرهای الکترونیکی می‌باشند. جهت کنترل و هدایت یک وسیله پرنده به طور کلی از نقطه نظر مهندسی مکانیک، دو روش وجود دارد که یکی از آنها استفاده از سطوح آیرودینامیکی به ویژه کنترل دم، و دیگری کنترل بردار پیشران است که به واسطه طراحی‌های خاصی، گازهای داغ خروجی از نازل از مسیر اصلی عمود بر سطح مقطع نازل منحرف شده و اجازه مانورپذیری را به پرنده مورد نظر می‌دهند. به طور کلی می‌توان کنترل بردار رانش را به دو دسته روش‌های مکانیکی و روش‌های استفاده از تزریق سیال ثانویه تقسیم‌بندی کرد. در روش تزریق سیال ثانویه، که مناسب برای هر دو نوع سیال گاز و مایع است، در نتیجه برخورد سیال ثانویه و اولیه، یک ناحیه تداخل متشکل از انواع شوک، گردابه‌ها، جدایش لایه مرزی، منطقه تماس مجدد، نقطه سکون، جریان‌های مارپیچی، جریان‌های برگشتی و غیره بوجود می‌آید که به دلیل رخداد شوک و تشکیل گردابه‌ها، توزیع فشار بر روی دیواره‌ها تغییر پیدا کرده و فشار بیشتری به طرف دیوار مقابل تزریق اعمال می‌شود. در نتیجه این نامتقارنی در نهایت منجر به تغییر راستای بردار رانش آن می‌شود. روش‌های مختلفی برای کنترل بردار رانش به کمک سیال ثانویه تا اکنون ابداع شده است. اولین روش، روش جابه‌جایی گلوله‌ها است. در این روش،

تزریق سیال ثانویه در خود گلوله نازل و یا کمی جلوتر از آن صورت می‌پذیرد. تزریق در این ناحیه این امکان را می‌دهد که با تغییر دادن شکل شوک موجود در گلوله، جریان به سمت دلخواه شکسته شود و در نتیجه بردار رانش منحرف گردد. روش دیگر، روش جریان همسو و جریان مخالف است که در این روش از یک پدیده فیزیکی تحت عنوان پدیده کواندا بهره گرفته می‌شود. این پدیده تمایل سیال به چسبیدن به یک سطح منحنی به علت کاهش فشار در ازای شتاب گرفتن جریان حول سطح است. به بیان دیگر در پدیده کواندا، جریان سیال به سمت سطح انحنا دار به دلیل وجود ناحیه فشاری کمتر منحرف می‌شود. این سطوح انحنا دار با نام کولار شناخته می‌شوند که در هر طرف جریان اصلی خروجی قرار می‌گیرند و بین این کولارها و جریان اصلی یک فاصله‌ای وجود دارد. یکی از معایب این روش احتمال چسبیدن جریان اصلی به صفحات کولار می‌باشد که منجر به تغییر ناگهانی زاویه بردار رانش، خواهد شد [۲]. روش دیگری تحت عنوان روش تزریق در نازل دو گلوله است که این نوع نازل‌ها شامل دو ناحیه بالادست و پایین دست و یک حفره فرورفته هستند که در بین یک نازل همگرا-واگرا-همگرا قرار دارد. یک جریان سیال ثانویه در ناحیه حداقل بالادست تزریق می‌شود که یک ناحیه جدید در پایین‌دست جریان ایجاد می‌کند. این ناحیه جدید ایجاد شده، صفحه صوتی را کج می‌کند که باعث جدا شدن جریان سیال در ناحیه فرورفته در نزدیکی تزریق انحراف بردار رانش می‌شود [۳]. روش کنترل بردار شوک روش کارآمد دیگری است که در آن، تزریق سیال در بخش واگرای نازل اتفاق می‌افتد، تزریق سیال در این ناحیه بر روی زاویه شوک ضربه‌ای تاثیر می‌گذارد. همچنین یک ناحیه فشار مجازی که مانند یک سطح شیب‌دار عمل می‌کند به وجود می‌آید. این سطح شیب‌دار باعث تولید شوک مایل شده و در عبور از شوک شکسته شده و منحرف می‌شود. روش‌هایی با بازدهای بالای دیگری که می‌توان از آن نام برد، روش‌های تزریق به کمک یک جریان کنارگذر هستند. در این روش، بخشی از جریان را بصورت کنار گذر قبل از رسیدن به گلوله خارج کرده و بصورت تزریق در بخش واگرا به جریان اصلی نیز بر می‌گردانند [۴].

بالو و همکارانش [۵] کارایی تزریق سیال ثانویه را به صورت سه‌بعدی و به واسطه پارامترهایی مثل ضریب بزرگنمایی و رانش محوری افزوده شده مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتایج خود را با نتایج تجربی مقایسه کردند. این مقایسه در نهایت نیز تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. کارن و همکارانش [۶] در مرکز تحقیقات لانگلی ناسا با انجام شبیه‌سازی عددی تأثیرات آیرودینامیکی بر بردار رانش، به این نتیجه رسیدند که روش تک معادله‌ای و توابع دیواره‌ها برای شبیه‌سازی جریان‌هایی با قسمت بزرگ جدا شده مناسب نیستند. ویت و همکاران [۷] به بررسی و تحلیل تزریق ثانویه چندگانه در نازل همگرا-واگرا دوبعدی به‌صورت آزمایشگاهی و عددی پرداختند. تزریق دو گانه باعث ایجاد دو شوک مایل شده که اولین آن در بالادست محل تزریق اول و دومین آن بین دو دریچه تزریق، واقع شده‌اند. با افزایش نسبت فشار جریان تزرفتی شوک بالادست جریان، قوی‌تر و نزدیک‌تر به گلوله نازل، شده است. هاشم‌آبادی و حیدری [۸] در سال ۲۰۰۹ به بررسی الگوریتم طراحی آیرودینامیکی کنترل بردار رانش به روش پاشش مایع از منظر دینامیک گازها پرداختند که در نهایت منجر به تدوین سیکل طراحی آیرودینامیکی این سیستم شده است. هانگ و

¹ Thrust Vector Control (TVC)

نازل مافوق صوت انجام دادند. برخی کارهایی که در چند سال اخیر در حوزه تحلیل عددی با استفاده از دیدگاه آنتروپی و اگزرژی انجام شده است در زیر اشاره شده است. برهونی و همکاران [۱۷] تعریف اگزرژی و کاربرد آن در میدان های جریان آیرودینامیک را ارائه کردند. آن ها با بررسی مقالات مختلف مشخص کردند که چگونه استفاده از انرژی در ترمودینامیک و کارآمد کردن اجزاء مکانیکی وسایل مختلف کاربرد دارند. آرگان و همکاران [۱۸] تحلیل جامعی برای تولید آنتروپی و اگزرژی را برای نسل آتی موتورهای هوایی که بخشی از هر موتوری نازل است، ارائه کردند. آن ها با این تحلیل ها میزان قابلیت تحمل اجزاء مختلف موتور را بررسی کردند. هایز و همکاران [۱۹] کاهش آنتروپی و تقریب های تحلیل اگزرژی را برای کاربردهای هوافضایی مرور کردند. ژو و همکاران [۲۰] کاربرد تئوری کاهش آنتروپی و اتلافات انرژی در پمپ ها و توربین ها را به طور جامع بررسی کردند. سروشان و همکاران [۲۱] به مطالعه شبیه سازی و تحلیل عددی تولید آنتروپی محلی و اگزرژی در پره استاتور یک توربین گاز پرداختند. آن ها با استفاده از داده های به دست آمده دیدگاه های بهبود طراحی پره با استفاده از تحلیل آنتروپی و اگزرژی را ارائه کردند. هوت و همکاران [۲۲] به بررسی اثر لزجت بر روی نویز تولید آنتروپی در نازل پرداختند. آن ها تغییرات نویز تولید آنتروپی در نازل را در حالت حل معادلات ناویراستوکس و اویلر مقایسه کردند و دریافتند بیشترین تغییرات نویز آنتروپی در بخش هایی از دیواره اتفاق می افتد. شماند و هروینگ [۲۳] به بهینه سازی طراحی نازل و دیفیوزر با استفاده از کاهش آنتروپی تولیدی پرداختند. آن ها با تحلیل هایی که انجام دادند و با استفاده از الگوریتم ژنتیک موارد بهینه کاهش آنتروپی در نازل و دیفیوزر را ارائه کردند. لیو و همکاران [۲۴] به مطالعه عددی ارزیابی عملکردی انتقال گرما، خصوصیات جریان، بازدهی اگزرژی و تحلیل آنتروپی در مباحث انتقال گرما و مبادله کن ها پرداختند. ژانگ و همکاران [۲۵] کاهش تولید آنتروپی با تزریق ذرات سدیم کلرید در نازل مافوق صوت بخار مرطوب را بررسی کردند.

همان طور که بررسی تحقیقات پیشین بر می آید در هیچ یک از تحقیقات در زمینه تزریق ثانویه سیال جهت کنترل بردار رانش از دیدگاه آنتروپی و اگزرژی بررسی نشده است. در پژوهش حاضر به شبیه سازی تولید آنتروپی محلی و اگزرژی تزریق سیال ثانویه در نازل همگرا-واگرا مافوق صوت در حالت های دوبعدی و سه بعدی که منجر به انحراف زاویه رانش می شود، پرداخته شده است. تولید آنتروپی محلی به دو بخش آنتروپی تولیدی گرمایی و آنتروپی تولیدی لزجی تقسیم شده و با دقت گسسته سازی مرتبه دوم و در حالت پایا تحلیل شده است. نوآوری پژوهش حاضر بررسی تزریق ثانویه سیال در نازل از دیدگاه تولید آنتروپی و اگزرژی و محاسبه دقیق تولید آنتروپی است. محاسبه آنتروپی تولیدی و اگزرژی تخریبی به صورت توابع تعریف شده توسط کاربر^۳ به زبان C به حلگر افزوده شده است. ترسیم کانتورهای آنتروپی تولیدی برای طراحان نازل بسیار کارایی دارد و تحلیل دقیق تر، جزئی و مناسبی از رفتار جریان در تزریق ثانویه در نازل مافوق صوت ارائه می دهد که در طراحی نازل بسیار حائز اهمیت است.

همکاران [۹] دریافتند که برای تزریق سیال ثانویه در یک جریان مافوق صوت مدل آشفتگی $k - \omega SST$ پاسخ های به مراتب بهتر و با دقت بالاتری را نسبت به سایر مدل های آشفتگی نتیجه می دهد. در این مطالعه نیز همچون دیگر مطالعات، نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاه مورد اعتبارسنجی قرار گرفتند. زمیجانویچ و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۳ به بررسی عددی و تجربی تزریق ثانویه سیال برای کنترل بردار رانش در یک نازل همگرا-واگرا متقارن پرداختند. در تصاویر منتج شده از مطالعه خطوط جریان، شوک منحنی و شوک انعکاسی به وضوح دیده می شود و تغییر مکان تزریق به سمت خروجی از برخورد شوک به دیواره مقابل و تشکیل منطقه چرخشی سیال جلوگیری می کند. دنگ و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۴، به بررسی تزریق سیال ثانویه در یک نازل مافوق صوت متقارن محوری تحت فشار اتمسفر پرداختند. در این تحقیق آنها توانستند محدوده هایی را که احتمال اتفاق نیافتادن انعکاس شوک وجود دارد را پیدا کنند. هی و همکارانش [۱۲] در سال ۲۰۱۷ نیز تحقیقاتی را روی تاثیرات تزریق سیال ثانویه بر عملکرد بردار شوک درون نازل انجام دادند. آن ها دریافتند که هر چقدر مقدار نسبت فشار تزریق^۱ بیشتر باشد، موج شوک ایجاد شده حاصل از آن نیز قوی تر خواهد بود. همچنین از این تحقیق مشخص شد که افزایش میزان نسبت فشار تزریق منجر به افزایش زاویه انحراف بردار رانش^۲ می شود اما این افزایش دائمی نیست و بعد از یک مقدار معینی بسته به هندسه و دیگر شرایط فیزیکی مسئله، این زاویه انحراف کاهش می یابد. فرقانی و همکارانش [۱۳] مطالعات عددی را در حالت ناپایا به جهت بررسی عملکرد کنترل بردار رانش انجام دادند. عدد ماخ در این تحقیق گستره-ای بین ۰/۵ تا ۱/۱ را شامل می شد و هندسه مورد استفاده در این تحقیق، یک نازل همگرا-واگرا با تزریق سیال ثانویه انتخاب گردید. نتایج نشان داد، با افزایش عدد ماخ در جریان اصلی، تاثیر منفی بر کنترل بردار شوک در نازل می گذارد. با این حال، افزایش نسبت فشار نازل، تاثیر منفی جریان خارجی بر زاویه بردار رانش و کارایی آن را کاهش می دهد. وو و همکارانش [۱۴] به بررسی عددی بردار رانش در یک نازل مخروطی شکل با دو گلوگاه پرداختند. آن ها پارامترهای مختلفی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق مشاهده شد که، بیشترین زاویه شوک مایل در زاویه تزریق ۱۲۰ درجه رخ می دهد درحالی که به عنوان نتیجه، زاویه ۱۵۰ درجه بیشترین تطابق و سازگاری را برای یک عملکرد جامع دارد. امیلیانوف و همکاران [۱۵] نیز بررسی سیستم تزریق ثانویه جهت کنترل بردار رانش را در نازل همگرا-واگرا انجام دادند. نتایج محاسبه شده در این تحقیق نشان داد که نسبت فشار، مهمترین متغیر در طراحی کنترل بردار رانش است. تاثیر پارامترهای هندسی شامل زاویه تزریق و محل تزریق سیال ثانویه، بر ساختار جریان نازل و عملکرد سیستم کنترل رانش مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که محل تزریق تاثیر به سزایی در برداردهی رانش دارد. اگر این محل خیلی دور در پایین دست باشد منجر به تشکیل جریان های معکوس در خروجی نازل می گردد و این جریان معکوس عملکرد سیستم را کاهش می دهد. حکیم و همکارانش [۱۶] نیز مطالعاتی روی حساسیت نسبت فشار نازل بر انحراف بردار رانش برای

^۱ Secondary Pressure Ratio (SPR)

^۲ Thrust Vector Angle

^۳ User Defined Function (UDF)

۲- معادلات حاکم

معادلات ناویر-استوکس در تمامی مسائل مکانیک سیالات ارایه می‌شود. این معادلات شامل معادلات پیوستگی، ممتم و انرژی هستند. معادله پیوستگی با اعمال قانون بقای جرم بر روی حجم کنترل ثابت تعیین می‌شود و به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

در این رابطه ρ چگالی سیال و U سرعت سیال است. عبارت اول در این معادله معرف نرخ شار جرمی عبوری از سطح حجم کنترل بر حجم واحد است. با استفاده از قانون دوم نیوتن بر روی حجم کنترل ثابت و کوچک که سیال از آن عبور می‌کند، معادله مومنتوم به شکل رابطه زیر ارایه می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(2\mu S_{ij})}{\partial x_j} + F_i \quad (2)$$

در رابطه فوق، p فشار، S_{ij} تانسور نرخ کرنش و F_i نیروهای حجمی وارد بر سیال از جمله نیروهای ناشی میدان‌های مغناطیسی می‌باشد.

با در نظر گرفتن قانون بقای انرژی بر واحد حجم کنترل ثابت، معادله انرژی به شکل زیر در می‌آید:

$$\rho \frac{De}{Dt} = -p \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + Q + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-q_j - \sum_k h_{kj} \right) \quad (3)$$

که در آن e انرژی داخلی مخصوص، q_j شار گرمایی، h_k آنتالپی مخصوص، τ_{ij} تانسور تنش برشی لزجی و Q تولید انرژی حجمی است. به جهت بررسی تلفات ناشی از جریان سیال در حجم کنترل‌های متفاوت از جمله نازل‌های همگرا-واگرا، باید آنتروپی تولیدی محلی (حجمی) مورد بررسی قرار بگیرد. از نقطه نظر ترمودینامیک می‌توان بیان کرد که تلفات یک جریان سیال ناشی از تولید آنتروپی محلی بوده که می‌توان آن را بصورت دو بخش آنتروپی لزجی و آنتروپی گرمایی معرفی کرد. رابطه زیر، تولید آنتروپی را بصورت مجموع آنتروپی تولیدی لزجی و گرمایی^۱ نشان می‌دهد.

$$\dot{s}_{gen} = \dot{s}_v + \dot{s}_t \quad (4)$$

که $\dot{s}_v$ آنتروپی تولیدی لزجی (ناشی از عدد رینولدز، لزجت سیال و گرادیان سرعت) و $\dot{s}_t$ آنتروپی گرمایی (ناشی از مکانیسم انتقال گرما و گرادیان‌های دما) است. همچنین معادله انتقال آنتروپی را پس از اعمال برخی مفاهیم و فرضیات می‌توان به صورت زیر نوشت [۲۶]:

$$\rho \frac{Ds}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{k}{T^2} \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} \right)^2 + \frac{\phi}{T} \quad (5)$$

در معادله فوق، پارامتر s نماد آنتروپی مخصوص، T دما و ϕ نماد تلفات لزجی انرژی جنبشی است. همان‌طور که مشخص است سمت چپ معادله نشان دهنده نرخ انتقال آنتروپی یک ذره سیال است و سه جمله سمت راست نیز به ترتیب شامل تغییر آنتروپی ناشی از بازگشت‌پذیری انتقال گرما، بازگشت‌ناپذیری انتقال گرما و تلفات لزجی است. جمله بازگشت‌پذیری گرمایی به دلیل ثابت فرض شدن دمای دیواره در این تحقیق از سمت راست معادله حذف می‌شود. برای آنتروپی تولیدی لزجی، در دستگاه دکارتی در حالت‌های دو بعدی و

سه بعدی مطابق با روابط (۶) و (۷) تعریف می‌شوند [۲۷-۲۹].

$$\dot{s}_v = \frac{2\mu_{eff}}{T} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (6)$$

$$\dot{s}_v = \frac{2\mu_{eff}}{T} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

در معادلات فوق پارامتر μ_{eff} نشان‌دهنده لزجت دینامیکی موثر است. و در رابطه (۷) جمله آخر آن در صورتی که محاسبات بر پایه سیال تراکم‌پذیر باشد در نظر گرفته می‌شود در غیر این صورت می‌توان از آن صرف نظر کرد. و در آخر نیز تولید آنتروپی گرمایی در دستگاه دکارتی در حالت دو بعدی و سه بعدی به ترتیب به شکل روابط (۸) و (۹) می‌باشند [۲۷-۲۹].

$$\dot{s}_t = \frac{k_{eff}}{T^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (8)$$

$$\dot{s}_t = \frac{k_{eff}}{T^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (9)$$

در معادلات فوق، پارامتر k_{eff} رسانایی گرمایی موثر می‌باشد. پس از بدست آمدن مقادیر مربوط به آنتروپی تولیدی گرمایی و لزجی، می‌توان آنتروپی تولیدی کل را بدست آورد. در آخر به جهت محاسبه میزان آگزروی تخریبی، می‌توان از رابطه (۱۰) استفاده کرد. در این معادله نماد T_0 معرف دمای مرجع سیستم می‌باشد.

$$\dot{E}_D = T_0 \dot{s}_{gen} \quad (10)$$

برای تعیین سهم آنتروپی تولیدی لزجی و گرمایی می‌توان از عدد بجان^۲ استفاده کرد. این نام از آدریان بجان، یک چهره برجسته در علوم گرمایی و برای به حداقل رساندن تولید آنتروپی گرفته شده است. عدد بجان یک عدد بی‌بعد است که در ترمودینامیک و انتقال گرما برای تجزیه و تحلیل نسبی انتقال گرما و برگشت‌ناپذیری جریان سیال به تولید کل آنتروپی در یک سیستم استفاده می‌شود و به صورت زیر معرفی می‌شود [۲۹].

$$Be = \dot{s}_t / (\dot{s}_t + \dot{s}_v) \quad (10)$$

با توجه به رابطه (۱۰)، عدد بجان بین صفر و یک قرار دارد. اگر عدد بجان صفر باشد سهم آنتروپی تولیدی لزجی فقط وجود دارد، اگر عدد بجان بین صفر و ۰/۵ باشد سهم آنتروپی تولیدی لزجی بر آنتروپی تولیدی گرمایی غالب است. اگر عدد بجان بین ۰/۵ تا ۱ باشد، سهم آنتروپی تولیدی گرمایی غالب است و در نهایت اگر عدد بجان ۱ باشد، تنها سهم آنتروپی تولیدی گرمایی خواهیم داشت.

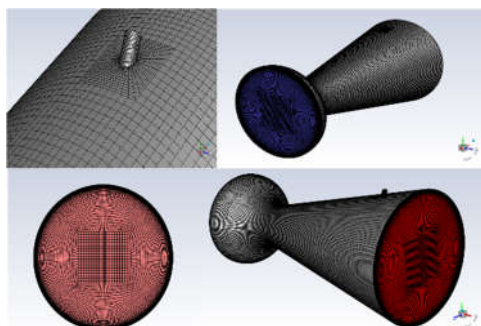
۳- بیان مساله و روند حل

در مسئله حاضر نازل همگرا-واگرا به دو صورت دوبعدی و سه‌بعدی مورد شبیه‌سازی و تحلیل قرار گرفته است. هدف از این کار ابتدا بررسی پارامترهای موثر بر کنترل بردار رانش با روش تزریق سیال ثانویه، و سپس بررسی میزان آنتروپی تولیدی و آگزروی تخریبی می‌باشد. به جهت شبیه‌سازی این حل از نرم‌افزار تجاری Fluent استفاده شده است. برای محاسبه فرمولاسیون میزان آنتروپی تولیدی و آگزروی تخریبی از توابع تعریف شده توسط کاربر که به صورت

² Bejan Number

¹ Viscous and Thermal Entropy Generation

شبیه‌سازی دیواره به صورت کاملاً عایق فرض شده و دمای سیال ورودی مقدار ۳۰۰ کلوین انتخاب شده است. همچنین سیال عامل ورودی و تزریقی به جریان اصلی به صورت گاز ایده‌آل هوا فرض شده است.

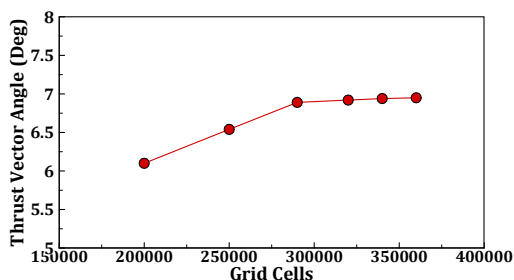


شکل ۲- شبکه‌بندی سه بعدی مورد استفاده در این شبیه‌سازی

۴- نتایج

۴-۱- استقلال از شبکه

حل صحیح معادلات ناور-استوکس، پیوستگی و انرژی به روش عددی، مستلزم یک شبکه با کیفیت است. این کار با بررسی استقلال از شبکه انجام می‌شود. برای شبیه‌سازی دو بعدی که از یک نازل همگرا-واگرا با دامنه بیرونی آن استفاده شده است. شکل ۳ تغییرات زاویه بردار رانش با تعداد شبکه را در حالت دوبعدی نشان می‌دهد. تعداد بهینه شبکه، مقدار حدود ۲۹۰,۰۰۰ سلول بدست آمده است. در این شبیه‌سازی به جهت مدل‌سازی زیر لایه لزج در مدل آشفتگی $k-\omega SST$ مقدار $k+\gamma$ برابر با یک در نظر گرفته شده است و به جهت اعتبارسنجی شبکه، پارامتر زاویه انحراف بردار رانش برای تزریق ثانویه ۳٪، با تعداد شبکه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شبیه‌سازی سه بعدی نیز همچون حالت دوبعدی، مراحل استقلال از شبکه انجام شده است. در این حالت هم مقدار γ^+ برابر با یک در نظر گرفته شده است تا تغییرات آشفتگی کنار دیواره به خوبی در شبیه‌سازی لحاظ گردند. تعداد شبکه بهینه در حالت سه بعدی نیز مقدار ۱۶۲۱۲۲۸ سلول بدست آمده است.

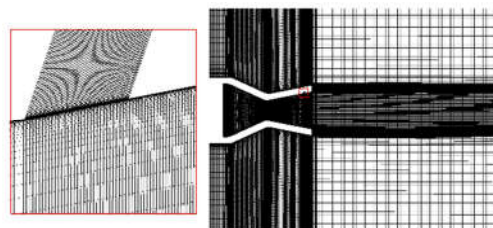


شکل ۳- انحراف بردار رانش بر حسب تعداد شبکه در حالت دوبعدی

۴-۲- اعتبارسنجی حل

در تمامی مسائل شبیه‌سازی در حوزه دینامیک سیالات محاسباتی، انجام اعتبارسنجی اولین قدم در حل مساله است. در تحقیق حاضر از مرجع [۳۱] جهت اعتبارسنجی مساله استفاده شده است. هندسه این مرجع در شکل ۱ نشان داده شده است. به جهت انجام

برنامه‌نویسی به زبان C به Fluent افزوده می‌شود، استفاده شده است. برای مدل آشفتگی، معمولاً مدل‌های دو معادله‌ای دارای دقت مناسبی هستند. در میان مدل‌های دو معادله‌ای، مدل آشفتگی $k-\omega SST$ به علت اصلاحاتی که در تنش‌های برشی توربولانس دارد، پیش‌بینی جریان با گرادیان‌های فشاری معکوس و جدایش جریان را به خوبی انجام می‌دهد. با توجه به این که کارایی این مدل آشفتگی در مراجع [۱۱، ۱۲، ۲۱، ۳۰] به اثبات رسیده است، به همین دلیل در تحقیق حاضر نیز از این مدل آشفتگی استفاده شده است. برای حل از روش چگالی مینا و برای نوع شارها از روش AUSM^۱ استفاده شده است. گسسته‌سازی مکانی برای گرادیان‌ها مبتنی بر حداقل مربعات سلولی^۲ و برای دیگر گسسته‌سازی‌ها از روش مرتبه دوم بالادست^۳ استفاده شده است. با توجه به این که انرژی تولیدی و انرژی تخریبی در نرم‌افزار محاسبه نمی‌شود، ابتدا لازم است که روابط (۶) و (۸) در حالت دوبعدی و روابط (۷) و (۹) در حالت سه بعدی به صورت UDF پیاده‌سازی شوند که محاسبات مربوط به این روابط در حین حل انجام شود، سپس رابطه (۴) برای انرژی تولیدی و رابطه (۱۰) برای انرژی تخریبی نیز در UDF محاسبه شوند. حال برای اینکه داده‌های مربوط به این پارامترها را بتوان به خروجی منتقل کرد و کانتور آن‌ها را نیز رسم کرد، به ازای هر پارامتر یک موقعیت حافظه تعریف شده توسط کاربر^۴ در بخش حافظه در برگه User-Defined نرم‌افزار تعیین می‌شود و در UDF نیز برای هر پارامتر یک دستور C_UDMI نوشته می‌شود که این پارامتر در هر سلول در خروجی نرم‌افزار رویت شود و بتوان کانتور و دیگر محاسبات را در پس پردازش انجام داد. از سویی هندسه‌های دوبعدی و سه بعدی مورد استفاده قرار گرفته در این تحقیق به ترتیب مطابق با مراجع [۳۱] و [۱۱] می‌باشند. شکل ۱ شبکه‌بندی برای هندسه دوبعدی و شکل ۲ شبکه‌بندی برای هندسه سه بعدی را نشان می‌دهند.



شکل ۱- شبکه‌بندی دو بعدی مورد استفاده در این شبیه‌سازی

شرایط مرزی استفاده شده در نازل‌های همگرا-واگرا عموماً دارای دو شرط مرزی ورودی یکی برای جریان سیال اصلی و دیگری برای جریان تزریق ثانویه و یک شرط مرزی خروجی در انتهای نازل و شرط مرزی دیواره برای بدنه نازل می‌باشد. بسته به فیزیک مساله و کاربرد وسیله پرنده، می‌توان از پارامترهای مختلفی برای شروط مرزی استفاده کرد. در حل حاضر، برای شرط مرزی ورودی عدد ماخ ۰/۲، شرط مرزی تزریق سیال ثانویه از نسبت‌های دبی جرمی و برای شرط مرزی خروجی، پارامتر فشار خروجی تنظیم شده است. در تمامی روند

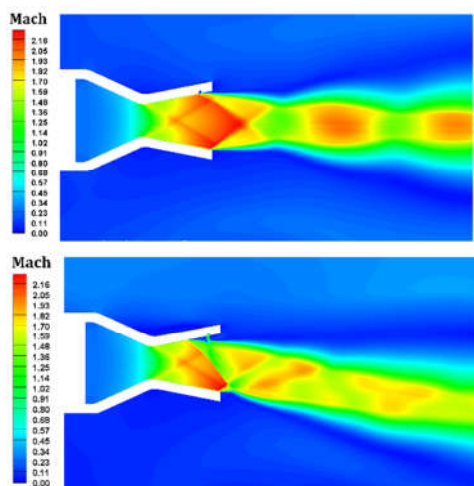
^۱ Advection upstream splitting method

^۲ Least Square Cell Based

^۳ Second Order Upwind

^۴ User-Defined Memory Locations

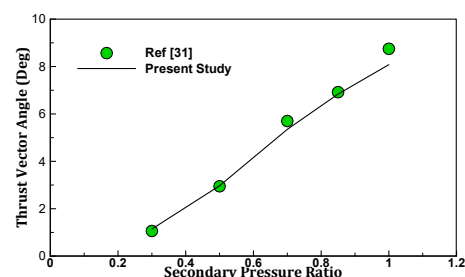
تزریق در موقعیت ۰/۸ (نسبت فاصله شکاف از گلوگاه به طول کل بخش واگرای نازل) و تزریق تحت زاویه ۱۲۰ درجه انجام شده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش میزان تزریق، مقدار زاویه انحراف بردار رانش نیز افزایش یافته است که این میزان افزایش در شکل ۷ نشان داده شده است.



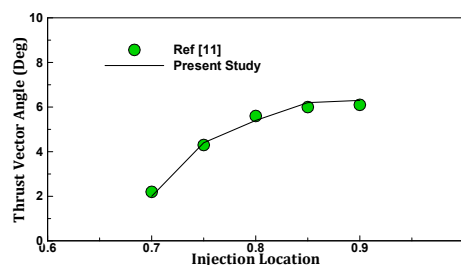
شکل ۶- کانتور عدد ماخ برای کمترین (شکل بالا) و بیشترین دبی (شکل پایین) تزریق

همان‌طور که مشخص است، افزایش دبی تزریقی ثانویه به شرط مکش جریان گاز از درون محفظه احتراق، به‌طور مستقیم به‌قدرت محفظه احتراق موتور بستگی دارد چرا که محفظه احتراق باید توانایی تامین این میزان دبی را بدون کاهش مقدار رانش اصلی داشته باشد. نکته دیگری که از شکل ۶ بدست می‌آید، این است که با افزایش میزان درصد دبی تزریق، نقطه جدایش جریان سیال به سمت بالادست حرکت می‌کند و این بدین معناست که جریان زودتر از دیواره نازل جدا می‌شود. همچنین فشار استاتیکی در آن ناحیه افزایش چشم‌گیری خواهد داشت و این افزایش فشار تا دهانه خروجی شکاف تزریق ادامه دارد. ازطرفی تنش برشی حاصل از عبور سیال، در نقطه جدایش به صفر می‌رسد و این موضوع را می‌توان یک مفهومی به جهت بررسی طول خط جدایش جریان اولیه سیال بر روی دیواره نازل، از شکاف تزریق در نظر گرفت که یکی از مهمترین موارد قابل بررسی در زمینه عملکرد سیستم‌های کنترل بردار رانش است. شکل ۷ تغییرات انحراف بردار رانش تحت تاثیر افزایش میزان دبی تزریق را نشان می‌دهد. در شکل ۸ خطوط جریان و ساختار شوک‌های مختلف ایجاد شده ناشی از تزریق جریان سیال ثانویه دیده می‌شود. در واقع در جلوی جت تزریقی با دو پدیده ایجاد شوک، یکی به واسطه جدایش لایه مرزی و دیگری به واسطه جسم پخ شبه جامد ناشی از تزریق جت مواجه هستیم. در هر دو حالت بعد از شوک با یک افزایش فشار مواجه خواهیم بود که خود عاملی برای تشکیل گردابه و بهم ریختگی جریان می‌باشد. زمانی که نرخ تزریق سیال ثانویه افزایش یابد، نقطه تشکیل شوک کماتی در نیز به سمت بالادست جریان حرکت می‌کند و قدرت جدایش جریان هم افزایش می‌یابد، این بدان معناست که لایه مرزی سیال اولیه درون نازل زودتر از سطح نازل جدا می‌شود و در حقیقت طول جدایش لایه مرزی

اعتبارسنجی، با تغییر نسبت فشارهای تزریقی سیال، نمودار تغییرات انحراف بردار رانش همانند شکل ۴ به‌دست آمد که این نمودار نشان می‌دهد که دقت حل عددی بسیار مناسب است. برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی سه‌بعدی با توجه به مرجع [۱۱] از یک نازل سه بعدی همگرا-واگرا استفاده شده که در آن پارامترهای مختلفی جهت بررسی، شبیه‌سازی شده‌اند که یکی از آن پارامترهای مهم و تاثیرگذار پارامتر فاصله محل تزریق سیال ثانویه از گلوگاه می‌باشد. در این مرجع با تغییر فاصله محل تزریق سیال ثانویه از گلوگاه، رفتار زاویه انحراف بردار رانش بررسی شده است. هندسه این مرجع در شکل ۲ نشان داده شده است برای شبیه‌سازی حاضر نیز انتخاب شده است. شکل ۵ تغییرات زاویه بردار رانش برحسب موقعیت تزریق را برای تحلیل حاضر و داده‌های مرجع [۱۱] را نشان می‌دهد. موقعیت تزریق با طول بخش واگرا بی‌بعد شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است نتایج حل عددی در حالت سه‌بعدی نیز دارای دقت بسیار مناسبی هستند.



شکل ۴- نمودار اعتبارسنجی، بر اساس نسبت فشارهای مختلف تزریق



شکل ۵- نمودار اعتبارسنجی، بر اساس موقعیت‌های مختلف تزریق

۴-۳- ارایه نتایج

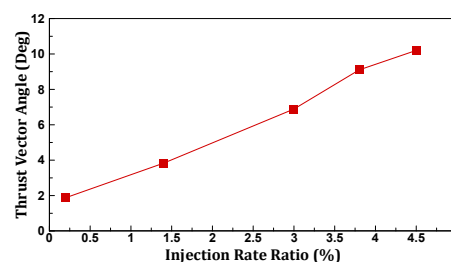
در حل حاضر، به جهت بررسی تاثیر تزریق سیال ثانویه بر زاویه بردار رانش در یک نازل همگرا-واگرا، به تزریق سیال ثانویه با در نظر گرفتن پارامترهای مختلفی پرداخته شده است. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، پارامترهای مهمی در تغییر بردار رانش وجود دارند که می‌توان به فاصله قرارگیری شکاف تزریق از گلوگاه، زاویه شکاف تزریق نسبت به محور افق، میزان فشار ورودی به نازل و میزان تزریق، اشاره کرد. در این مقاله با ثابت در نظر گرفتن نسبت فشار ورودی برای حالت دو بعدی و با ثابت نگه داشتن محل و زاویه تزریق برای حالت سه‌بعدی، به اثرات مختلف پارامترهای دیگر طراحی، پرداخته شده است.

در حل دو بعدی ابتدا درصدهای تزریق به ترتیب ۰/۲۴، ۰/۴، ۰/۸، ۱/۴، ۳/۸ و ۴/۵ درصد سرعت ورودی برابر عدد ماخ ۰/۲ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین تمامی دیواره‌ها عایق و دمای ورودی سیال ۳۰۰ کلوین فرض شده است. شکل ۶ کانتور عدد ماخ را برای به ترتیب کمترین و بیشترین دبی تزریق نشان می‌دهد. در این حالت شکاف

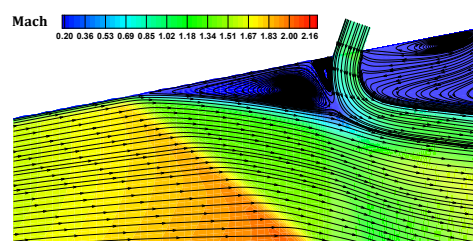
مجموع دو آنتروپی تولیدی لزجی و گرمایی می‌باشد. در نازل‌های همگرا-واگرا به دلیل افزایش سرعت سیال بعد از گلوگاه نازل، گردادیان‌های شدید سرعت در لایه مرزی رخ می‌دهند که منبع تولید آنتروپی لزجی نیز می‌باشند یعنی به طور کلی در داخل لایه مرزی تولید آنتروپی لزجی به دلیل وجود گردادیان‌های شدید سرعت، سهم بیشتری را نسبت به تولید آنتروپی گرمایی دارد. همچنین همانطور که در شکل ۹ آورده شده است مجموع این دو نرخ تولید آنتروپی در دامنه محاسباتی تحقیق حاضر نشان می‌دهد که تولید آنتروپی کل در محل تزریق سیال ثانویه مقدار قابل توجهی را دارد چرا که در آن ناحیه دو جریان مختلف سیال با یکدیگر مخلوط شده‌اند و ترکیب آن‌ها منجر به تولید آنتروپی شده و این میزان تا انتهای خروجی از دهانه نازل کشیده شده است. از طرفی جدایش جریان و تخریب لایه مرزی نیز که موجب تشکیل گردابه‌هایی در جلو و پشت جریان تزریقی شده، تولید آنتروپی را نیز در این نواحی افزایش می‌دهد که سهم تولید آنتروپی لزجی از گرمایی به مراتب بیشتر می‌باشد. از طرفی به دلیل اینکه تولید آنتروپی یک پدیده‌ای خلاف تخریب اغرژری است، کانتور انهدام اغرژری نیز همانند تولید آنتروپی می‌باشد و در آن نیز زمانی که دبی تزریق افزایش می‌یابد به واسطه ایجاد شوک‌های کمانی و فشاری در نازل، نرخ اغرژری تخریبی نیز افزایش پیدا می‌کند، چرا که برخورد دو جریان بصورت متقاطع به یکدیگر باعث جدایش سیال از روی دیواره و جدایش لایه مرزی می‌شود که در چنین موارد به دلیل وجود گردادیان‌های زیاد سرعت در لایه مرزی میزان اغرژری تخریبی رشد قابل ملاحظه‌ای را دارد. بدیهی است که در نسبت تزریق‌ها و زاویای تزریق دیگر و همچنین موقعیت‌های تزریق مختلف، شرایط مشابهی با آنچه در شکل ۹ نشان داده شد وجود دارد و صرفاً تفاوت‌هایی در قدرت و رشد آن‌ها وجود دارد.

شکل ۱۰ پدیده انعکاس شوک در نزدیک‌ترین نسبت موقعیت تزریق به گلوگاه را نشان می‌دهد. از این شکل مشخص است که به جهت قرارگیری نزدیک‌تر شکاف تزریق به گلوگاه نسبت به حالت‌های دیگر (موقعیت ۰/۳)، لایه مرزی سیال بر روی دیواره پایینی نازل بر اثر برخورد شوک مایل قوی ایجاد شده، به هم ریخته است و یک ناحیه چرخشی بین دو نقطه جدایش لایه مرزی و اتصال لایه‌مرزی همان‌طور که قبلاً به آن اشاره شد، بوجود آمده است. این برخورد شوک به دیواره اگر با قدرت تزریق بیشتری اتفاق افتاده باشد می‌تواند حتی باعث انحراف زاویه بردار رانش به سمت خلاف جهت پیش‌بینی شده نیز بشود و این به معنای آن است که افزایش میزان دبی تزریق سیال ثانویه، تا یک جایی منجر به افزایش زاویه انحراف بردار رانش می‌شود و از مقداری بیشتر موجب کاهش و بازدهی منفی سیستم کنترل خواهد گشت. همچنین موقعیت جدایش جریان با حرکت موقعیت تزریق به سمت بالادست، به همان سمت نیز حرکت خواهد کرد و در نهایت هر چه برخورد شوک در محلی نزدیک‌تر به گلوگاه رخ دهد، منطقه وسیع‌تری از دیواره را تحت تاثیر قرار می‌دهد لذا اثرات تخریبی آن روی نسبت رانش مشهودتر است. در شکل ۱۱، نحوه افزایش زاویه بردار رانش با افزایش فاصله قرارگیری شکاف تزریق از گلوگاه نازل نشان داده شده است. بدین منظور هر چه شکاف تزریق از محل گلوگاه دورتر باشد، انحراف بردار رانش بهتری رخ می‌دهد.

در بالادست جریان، قبل از رسیدن به محل تزریق افزایش می‌یابد، که بررسی این طول جدایش مهم‌ترین عامل در طراحی و ارزیابی سیستم‌های کنترل بردار رانش می‌باشد. از طرفی فشار استاتیکی جریان اولیه درون نازل نیز با رسیدن به شوک مایل ایجاد شده به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد و تغییرات فشار شدیدی در نقطه جدایش جریان رخ می‌دهد چرا که تزریق سیال در این‌جا به صورت یک جسم در مقابل جریان بالادست اولیه عمل می‌کند و برخورد جریان بالادست به آن، منجر به کاهش سرعت و افزایش شدید فشار و در نهایت انحراف مسیر جریان سیال از مسیر اولیه خود می‌شود.

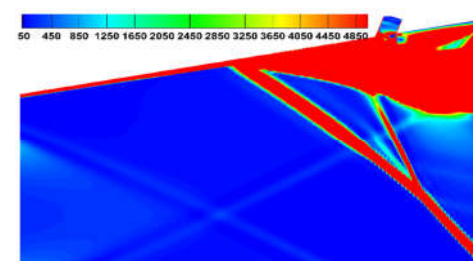


شکل ۷- انحراف بردار رانش بر اساس میزان تزریق‌های متفاوت



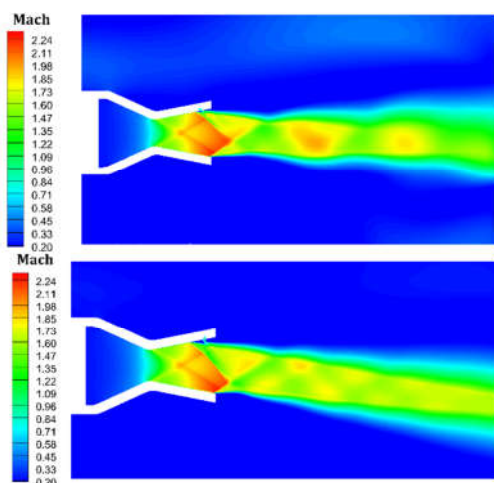
شکل ۸- خطوط جریان برای نسبت تزریق ۳/۸

همانطور که قبلاً به آن اشاره شد آنتروپی تولیدی محلی کل از مجموع دو آنتروپی محلی حاصل از لزجت سیال و حاصل از انتقال گرمایی است که منتقل می‌شود. همچنین میزان تاثیرگذاری هر کدام از آن‌ها، با یک عدد بدون بعد، تحت عنوان عدد بجان مشخص می‌شود. شکل ۹ کانتور آنتروپی تولیدی محلی کل در کنار دیواره تزریق سیال ثانویه را برای میزان دبی تزریق ۳/۸ نشان می‌دهد.



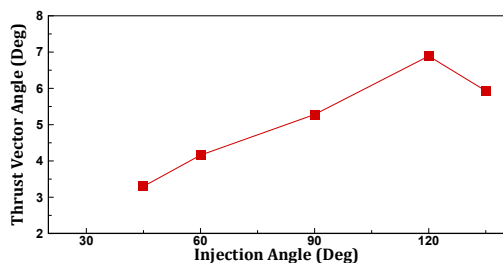
شکل ۹- کانتور تولید آنتروپی در تزریق ۳/۸

بر طبق آنچه در شکل ۹ دیده می‌شود، با افزایش دبی تزریق جت ثانویه، تولید آنتروپی در ناحیه تزریق به صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد. از طرفی وجود شوک کمانی و فشاری قوی در تزریق ۳/۸ نیز باعث تولید آنتروپی بیشتری در سیستم می‌شود چرا که وقوع شوک در یک جریان سیال، تغییرات ناگهانی زیادی را در خواص ترمودینامیکی آن جریان ایجاد می‌کند. همانطور که قبلاً بیان شد آنتروپی تولیدی کل



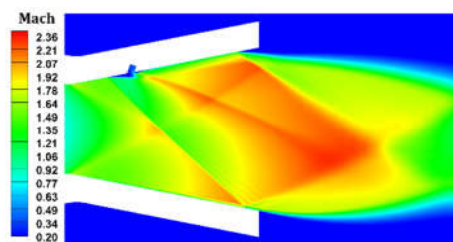
شکل ۱۲- کانتور عدد ماخ برای به ترتیب زوایای تزریق ۴۵ و ۱۲۰ درجه

در حل سه بعدی حاضر از یک نازل همگرا-واگرا با محل و زاویه تزریق ثابت در موقعیت بهینه آن استفاده شده است و شبیه سازی برای دبی های مختلف تزریق به ترتیب ۲/۲، ۲/۸، ۳/۸، ۴/۴ و ۶/۶ درصد نیز صورت گرفته است. در این حالت سرعت ورودی سیال عامل در مرز ورودی هندسه دارای ماخ ۰/۲ است و نرخ نسبت فشار ورودی نیز مقدار ۲۰ می باشد. همچنین همانند حل دوبعدی، دیوارها عایق فرض شده، و دمای سیال نیز مقدار ۳۰۰ کلوین لحاظ گردیده است. اما تفاوت این حل با حل دوبعدی در ارتفاع پروازی است و شبیه سازی سه بعدی برای ارتفاع پروازی بالاتر با فشار کمتر از یک اتمسفر انجام شده است که به نسبت، باعث کاهش فشار هوای اطراف نازل نیز می گردد.

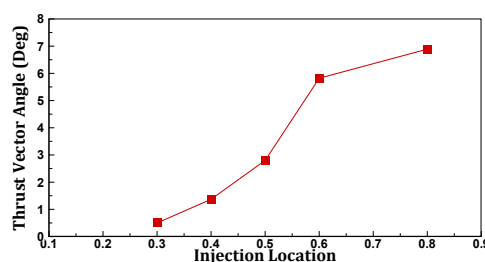


شکل ۱۳- انحراف بردار رانش بر اساس زوایای مختلف تزریق

همان طور که از شکل ۱۴ مشخص است، با افزایش درصد دبی تزریق سیال ثانویه، زاویه شوک مایل ایجاد شده بیشتر شده است. این افزایش زاویه در نهایت باعث افزایش زاویه انحراف بردار رانش نیز می شود. همچنین مشاهده می شود که جدایش لایه مرزی با افزایش درصد دبی تزریق نیز به سمت بالادست جریان حرکت می کند، یعنی این جدایش و به دنبال آن شوک مایل نیز زودتر اتفاق می افتد. تفاوت شبیه سازی دوبعدی با سه بعدی در این است که در شبیه سازی های دوبعدی، اجازه گسترش به جریان سیال در جهت محور z مختصات داده نمی شود و همین امر موجب محدود شدن جریان و در نهایت تشکیل زودتر شوک های مورد نظر می گردد. همچنین امکان وقوع انعکاس شوک دور از انتظار به نظر می رسد چرا که شوک حاصل از تزریق سیال ثانویه به دلیل توانایی حرکت در جهت محور z در دستگاه مختصات، در کل دامنه حل پخش می شود و معضل وقوع زودتر از موعد پدیده ها اتفاق نمی افتد. همچنین مشاهده می شود که بر اثر تزریق جریان ثانویه، یک



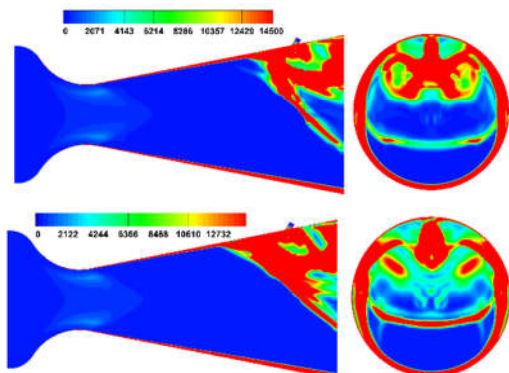
شکل ۱۰- پدیده انعکاس شوک در نزدیک ترین نسبت موقعیت تزریق به گلوگاه



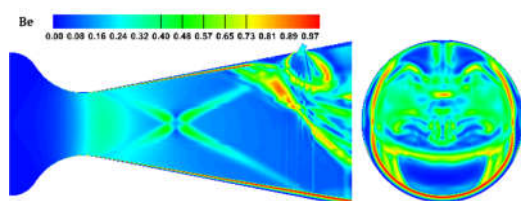
شکل ۱۱- انحراف بردار رانش بر اساس موقعیت های تزریق متفاوت

در شکل ۱۲ همان طور که مشاهده می گردد تغییر بردار رانش بر اساس تغییر زاویه شکاف تزریق می تواند مفید باشد اما تغییر این زاویه تزریق در یک محدوده ای برای سیستم مفید بوده و انحراف بردار را بصورت مطلوب نشان می دهد. زاویه بهینه برای تزریق در این پژوهش، زاویه ۱۲۰ درجه می باشد زیرا در این زاویه بیشترین مقدار انحراف بردار رانش حاصل شده است. همان طور که بیان شد میزان زاویه تزریق یک مقدار بهینه ای دارد و اگر از آن تجاوز کند منجر به کاهش زاویه انحراف بردار رانش می گردد. این مسئله در نمودار شکل ۱۳ به خوبی نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، مقدار انحراف بردار رانش تا زاویه ۱۲۰ درجه روند صعودی دارد و از آن به بعد کاهش می یابد. مساله ای که انتخاب یک زاویه درست جهت تزریق را مهم می سازد این است که تزریق تحت زاویه اگر با مقدار دبی جرمی زیادی صورت بگیرد می تواند نقطه جدایش لایه مرزی روی دیواره نازل را به سمت بالادست جریان سوق دهد و این کار همانند این است که موقعیت تزریق در بالادست جریان نزدیک به گلوگاه قرار داشته باشد. به همین جهت طراحی خوب برای سیستم کنترل بردار رانش به روش تزریق سیال ثانویه باید سه پارامتر میزان دبی تزریق، موقعیت تزریق و زاویه تزریق را بصورت هماهنگ و مناسب در کنار یکدیگر داشته باشد. در حل سه بعدی نیز همانند حل دو بعدی، از یک نازل همگرا-واگرا با یک شکاف جهت تزریق سیال ثانویه به عنوان هندسه مورد نظر در این پژوهش استفاده شده است. حل سه بعدی جریان سیال از این منظر قابل توجه است که در شبیه سازی های دو بعدی یکسری خصوصیات جریان مانند تاثیر سطح مقطع، نادیده گرفته می شوند که طبیعتاً می تواند روی نتایج حاصل، تاثیر بگذارد. از طرفی جریان سیال آشفته ذاتاً یک جریان سه بعدی است چرا که ادی های حاضر در رژیم جریان آشفته در حالت سه بعدی بر اثر پدیده کشیدگی گردابه ای و با توجه به قانون آبشار انرژی در جریان های آشفته، تبدیل به ادی های کوچک تر می شوند و در نهایت توسط نیروهای لزجت به گرما تبدیل می گردند.

فلذا تولید آنتروپی در آن‌ها نیز افزایش قابل توجهی را دارد. همچنین تخریب آگزروی مطابق با آنچه در حل دوبعدی دیده شده عکس تولید آنتروپی می‌باشد و می‌توان این نکته را خاطر نشان کرد که هر جا آنتروپی تولید شود، آگزروی نیز تخریب می‌شود و سیستم قابلیت کاردهی خود را به میزان خاصی از دست خواهد داد.



شکل ۱۶- کانتور آنتروپی تولیدی برای تزریق ۲/۲٪ (کانتور بالا) و ۶/۶٪ (کانتور پایین)



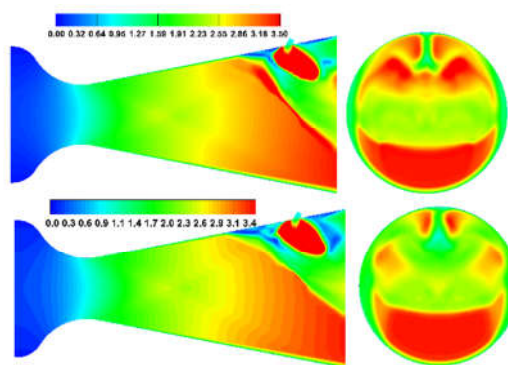
شکل ۱۷- کانتور عدد بجان برای تزریق ۲/۲٪

شکل ۱۷ کانتور عدد بجان برای تزریق ۲/۲٪ را نشان می‌دهد. توضیحات کامل در مورد عدد بجان در بخش ۲ مقاله داده شده است. آنتروپی تولیدی گرمایی در نواحی که گرادیان دما افزایش می‌یابد مانند پس از شوک بالاتر است. اگر سیال تزریقی با جریان اصلی به‌طور کامل مخلوط نشود، در نواحی که لایه‌های دمایی ناهمگن تشکیل می‌شوند که آنتروپی گرمایی را تشدید می‌کند. اما قبل از شوک، آنتروپی تولیدی لزجی بیشتر است. در ناحیه تزریق، گرادیان سرعت محلی بین جریان اصلی و سیال تزریقی بسیار زیاد است بنابراین در این بخش اثر آنتروپی تولیدی لزجی بیشتر است. در لایه‌مرزی و نواحی دارای جدایش جریان نیز به‌طور مشخص با توجه به این‌که گرادیان سرعت زیاد می‌شود، اثر آنتروپی تولیدی لزجی بیشتر است. اما در بالای لایه مرزی با توجه به این‌که گرادیان سرعت کاهش شدیدی پیدا می‌کند اما گرادیان دما داریم، آنتروپی تولیدی گرمایی بیشتر است. اما در این تحلیل‌ها، نتایج نشان می‌دهد سهم آنتروپی تولیدی لزجی بیشتر از آنتروپی تولیدی گرمایی است.

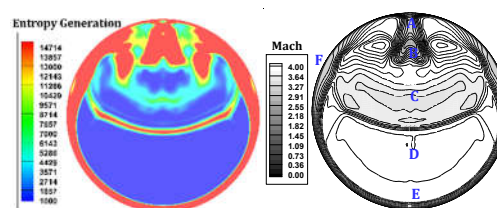
۵- نتیجه‌گیری

آنتروپی تولیدی یک پارامتر کلیدی برای تعیین عوامل محدودکننده عملکردی در بسیاری از سیستم‌های مهندسی است. در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی و تحلیل تزریق ثانویه سیال در نازل که برای کنترل بردار رانش استفاده می‌شود، از دیدگاه آنتروپی و آگزروی انجام شده است. در تحقیق حاضر تحلیل به‌صورت دوبعدی و سه‌بعدی از

شوکه خمره‌ای شکل در پشت شکاف تزریق بوجود می‌آید که با افزایش این میزان دبی، این شوک خمره‌ای بزرگتر می‌شود. از طرفی همان‌طور که در کانتور عدد ماخ در خروجی نازل در شکل ۱۴ دیده می‌شود، چندین ناحیه در خروجی نازل بر اثر تزریق ثانویه تشکیل می‌گردند که در شکل ۱۵ با جزئیات بیشتری به آن‌ها اشاره شده است.



شکل ۱۴- کانتور عدد ماخ برای حل سه‌بعدی در نسبت تزریق‌های به‌ترتیب ۲/۲٪ (کانتور بالا) و ۶/۶٪ (کانتور پایین)



شکل ۱۵- خطوط کانتور عدد ماخ و کانتور تولید آنتروپی در خروجی برای تزریق ۲/۸٪

در شکل ۱۵ کانتور ماخ و تولید آنتروپی در خروجی نازل برای حالت نسبت تزریق ۲/۸٪ نشان داده شده است. در این شکل می‌توان چندین ناحیه مختلف را در خروجی نازل در کانتور ماخ بصورت مجزا تعیین کرد. ناحیه A در تصویر منطقه‌ای است که در آن به دلیل حضور جریان تزریقی ثانویه افت فشار محسوسی رخ داده است و باعث ایجاد جدایش و تشکیل گردابه‌های جریان سیال اولیه پشت آن می‌شود. ناحیه B نیز که در پایین بخش A قرار دارد معرف دیسک ماخ ناشی از تزریق جت سیال است. بخش میانی خروجی نازل نیز منطقه C نامیده می‌شود که توسط دیسک ماخ، شوک مایل و گردابه‌های نعل اسبی احاطه گشته است. و نواحی D و F بخش‌های مختل نشده جریان اولیه هستند به این معنا که تزریق جریان ثانویه سیال نتوانسته است که تاثیری بر این نواحی جریان اولیه بگذارد. بخش‌های پایین نازل هم که با نام ناحیه E نام‌گذاری می‌شوند نواحی هستند که لایه مرزی جریان سیال اولیه تخریب نشده‌اند و جدایشی در آن منطقه رخ نداده است. شکل ۱۶ نشان دهنده تولید آنتروپی کل بعد از تشکیل شوک مایل بوده که به شدت افزایش یافته است. همچنین هر چقدر دبی تزریق بیشتر می‌شود، این تولید آنتروپی و آشفستگی بعد از شوک، ناحیه بزرگتری را به خود نسبت می‌دهد. در کانتور آورده شده برای قسمت خروجی نازل، مشخص است که با افزایش نرخ دبی تزریق، لایه مرزی در کنار دیواره‌های مجاور شکاف نیز بیشتر تحت تاثیر قرار می‌گیرند

into a supersonic cross flow of an axisymmetric convergent-divergent nozzle. *progress in Propulsion Physics*. 2013;4:227-56.

[11] Deng R, Kong F, Kim HD. Numerical simulation of fluidic thrust vectoring in an axisymmetric supersonic nozzle. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2014;28:4979-87.

[12] He C, Li J, Li Y, Liang J. Influence of secondary injection parameters on performance of shock vector control nozzle. 21st AIAA International Space Planes and Hypersonics Technologies Conference 2017. p. 2270.

[13] Forghany F, Taeibe-Rahni M, Asadollahi-Ghohieh A. Numerical investigation of freestream flow effects on thrust vector control performance. *Ain Shams Engineering Journal*. 2018;9:3293-303.

[14] Wu K, Kim T, Kim H. Numerical study of fluidic thrust vector control using dual throat nozzle. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2020;14:73-87.

[15] Emelyanov V, Yakovchuk M, Volkov K. Multiparameter optimization of thrust vector control with transverse injection of a supersonic underexpanded gas jet into a convergent divergent nozzle. *Energies*. 2021;14:4359.

[16] Hakim K, Toufik H, Mouloudj Y. Study and simulation of the thrust vectoring in supersonic nozzles. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2022;93:13-24.

[17] Berhouni I, Bailly D, Petropoulos I. On the Definition of Exergy in the Field of Aerodynamics. *AIAA Journal*. 2023;61:4356-66.

[18] Aygun H, Erkara S, Turan O. Comprehensive exergo-sustainability analysis for a next generation aero engine. *Energy*. 2022;239:122364.

[19] Hayes D, Lone MM, Whidborne J, Coetzee E. Entropy Generation Minimisation and Exergy analysis approaches for aerospace applications-A review. 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting 2016. p. 0866.

[20] Zhou L, Hang J, Bai L, Krzemianowski Z, El-Emam MA, Yasser E, et al. Application of entropy production theory for energy losses and other investigation in pumps and turbines: A review. *Applied Energy*. 2022;318:119211.

[21] Soroushan M, Parhizkar H, Pirkandi J. 3D-Simulation and Numerical Analysis of the Local Entropy Generation and Exergy Destruction in a Stator Vane of a Typical Gas Turbine. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2019;52:3125-42.

[22] Huet M, Emmanuelli A, Ducruix S. Influence of viscosity on entropy noise generation through a nozzle. *Journal of Sound and Vibration*. 2021;510:116293.

[23] Schmandt B, Herwig H. Diffuser and nozzle design optimization by entropy generation minimization. *Entropy*. 2011;13:1380-402.

[24] Liu Q, Zhang Y, Zhang X, Luo J, Zheng J, Liu Y, et al. Numerical study on the heat transfer performance evaluation, flow characteristics, exergy efficiency, and entropy generation analysis of a novel coaxial geothermal heat exchanger. *Journal of Building Engineering*. 2024;84:108555.

[25] Zhang G, Wang X, Dykas S, Aliabadi MAF. Reduction entropy generation and condensation by NaCl particle injection in wet steam supersonic nozzle. *International Journal of Thermal Sciences*. 2022;171:107207.

[26] Perez E. Entropy generation in a highly-loaded, axial turbine: University of Notre Dame; 2015.

[27] Yapıcı H, Kayataş N, Kahraman N, Baştürk G. Numerical study on local entropy generation in compressible flow through a suddenly expanding pipe. *Entropy*. 2005;7:38-67.

[28] Hassan H. Evaluation of the local exergy destruction in the intake and fan of a turbofan engine. *Energy*. 2013;63:245-51.

[29] Wei Y, Wang Z, Qian Y. A numerical study on entropy generation in two-dimensional Rayleigh-Bénard convection at different Prandtl number. *Entropy*. 2017;19:443.

[30] Wu K, Dong Kim H. Numerical study on the shock vector control in a rectangular supersonic nozzle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2019;233:4943-65.

[31] Chen J-L, Liao Y-H. Parametric study on thrust vectoring with a secondary injection in a convergent-divergent nozzle. *Journal of Aerospace Engineering*. 2020;33:04020020.

دیدگاه آنتروپی و اگزرژی انجام شده است. محاسبات مربوط به آنتروپی تولیدی و اگزرژی تخریبی به صورت کدنویسی به حلگر افزوده شده است. در این تحقیق، پارامتر اصلی یعنی میزان دبی‌های مختلف تزریق، و تاثیر آن بر روی انحراف بردار رانش ناشی از گازهای خروجی، مورد مطالعه قرار گرفته است. در پایان نیز نحوه پراکندگی آنتروپی تولیدی و اگزرژی تخریبی مورد بررسی نیز قرار گرفتند. برخی از نتایج بدست آمده به شرح زیر است:

- با قرار داشتن موقعیت شکاف تزریق در ناحیه ۰/۸ با زاویه تزریق ۱۲۰ درجه، با افزایش دبی تزریق، زاویه انحراف بردار رانش افزایش می‌یابد و همچنین میزان تولید آنتروپی محلی کل و اگزرژی تخریبی نیز زیاد می‌شود.
- با افزایش دبی تزریق، نقطه جدایش سیال به گلوگاه نازل نزدیک‌تر می‌شود و می‌تواند منجر به انعکاس شوک گردد.
- در نقطه جدایش جریان در مقابل تزریق سیال ثانویه، تنش برشی دیواره مقدار صفر را دارد و این مسئله تا زمان نقطه اتصال مجدد لایه مرزی در پشت شکاف تزریق ادامه دارد.
- محل‌های ایجاد گردابه‌ها و شوک‌ها یکی از اصلی‌ترین بخش‌ها برای تولید آنتروپی و اگزرژی تخریبی هستند.
- میزان تولید آنتروپی لزجی به دلیل وجود گرادیان‌های شدید سرعت در لایه مرزی از میزان تولید آنتروپی گرمایی با توجه به عدد بجان بیشتر است.
- میزان تولید آنتروپی کل و اگزرژی تخریبی با افزایش فاصله قرارگیری شکاف تزریق از گلوگاه افزایش می‌یابند.
- با توجه به افزایش آنتروپی تولیدی در بعد از موقعیت تزریق، این افزایش آنتروپی باید در فرآیند طراحی نازل مدنظر قرار گیرد.

۶- مراجع

[1] Dincer I, Rosen MA. *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. 3rd Edition ed: Elsevier; 2020.

[2] Banazadeh A, Saghaei F, Ghoreyshi M, Pilidis P. Experimental and computational investigation into the use of co-flow fluidic thrust vectoring on a small gas turbine. *The Aeronautical Journal*. 2008;112:17-25.

[3] Afridi S, Khan TA, Shah SIA, Shams TA, Mohiuddin K, Kukulka DJ. Techniques of Fluidic Thrust Vectoring in Jet Engine Nozzles: A Review. *Energies*. 2023;16:5721.

[4] Flamm J. Experimental study of a nozzle using fluidic counterflow for thrust vectoring. 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit 1998. p. 3255.

[5] Balu R, Marathe A, Paul P, Mukunda H. Analysis of performance of a hot gas injection thrust vector controlsystem. *Journal of Propulsion and Power*. 1991;7:580-5.

[6] Deere K. Computational investigation of the aerodynamic effects on fluidic thrust vectoring. 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit 2000. p. 3598.

[7] Waithe K, Deere K. An experimental and computational investigation of multiple injection ports in a convergent-divergent nozzle for fluidic thrust vectoring. 21st AIAA applied aerodynamics conference 2003. p. 3802.

[8] hashemabadi M, Heidari MR. Aerodynamic Design Algorithm of Liquid Injection Thrust Vector Control. *Journal of Aerospace Science and Research*. 2009;2:27-35.

[9] Huang W, Liu W-d, Li S-b, Xia Z-x, Liu J, Wang Z-g. Influences of the turbulence model and the slot width on the transverse slot injection flow field in supersonic flows. *Acta Astronautica*. 2012;73:1-9.

[10] Zmijanovic V, Lago V, Leger L, Depussay E, Sellam M, Chpoun A. Thrust vectoring effects of a transverse gas injection