

تدوین الگوریتم طراحی و ساخت یک تراستر گاز گرم و مقایسه با نتایج تجربی

مجید کاظمی اسفنه^۱، محمدعلی جزووزیری^۲

۱ کارشناسی ارشد هوافضا، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، majid.kazemi.mke@gmail.com

۲ عضو هیئت علمی، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۱۹

چکیده

در این پژوهش به طراحی، ساخت و تست تجربی یک نمونه تراستر^۱ گاز گرم یا پینتل ولو^۲ پرداخته شده است. برای این منظور نخست از روش‌هایی چون روش مشخصه‌ها و طراحی معکوس استفاده شده است که به دلیل محدودیت‌های موجود در این روش‌ها، نتایج مطلوبی حاصل نشد و سرانجام از روش پیش‌بینی و اصلاح استفاده شد. سپس پارامترهای مؤثر در عملکرد تراستر مانند قطر گلوگاه، قطر ورودی و خروجی شیر و پروفیل همگرا و واگرا مورد بررسی قرار گرفت و سرانجام با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۱/۲ تراستری با تراست خروجی در حدود ۳۲۰۰۰ نیوتن طراحی شد. سپس زاویه ورودی گاز داغ به تراستر مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به محدودیت‌های موجود، زاویه ورودی ۳۰ درجه به عنوان زاویه بهینه تعیین شد. در پایان، شیر طراحی شده‌ای با زاویه ورودی ۹۰ درجه ساخته و به صورت تجربی تست شد. نتایج تراست تست تجربی از انطباق قابل قبولی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی برخوردار بود و میزان خطای کمتر از ۱۰ درصد را نشان داد.

واژگان کلیدی

تراستر گاز گرم، بردار تراست، پینتل ولو، پیش‌بینی و اصلاح

۱. مقدمه

منبع پرفشار سیال تغذیه می‌شوند. با دمش گاز از این نازل‌ها نیروی عکس‌العمل در جهت مخالف وارد شده و پرنده مانور مورد نظر را انجام می‌دهد [۱]. این نوع کنترل عموماً در محلی که نیروهای ائرو‌دینامیکی ضعیف‌اند (در خارج از جو یا در نقاطی که سرعت پرنده کم باشد) استفاده می‌شود. از جت‌های عکس‌العملی عموماً در وسائلی چون ماهواره‌برها، موشک‌های بالستیک، کپسول‌های فضایی و قمرنشین‌ها استفاده می‌شود. جت‌های

روش کنترل نامتعارف گونه‌ای از روش‌های متداول در کنترل اجسام پرنده است که شامل دو حالت اصلی کنترل پرنده با تغییر بردار تراست و کنترل با کمک جت‌های عکس‌العملی می‌باشد. در حالت کنترل بردار رانش، یا دهانه خروجی موتور متحرک بوده که با حرکت آن وسیله پرنده مانور می‌دهد و یا در مانوردهی از بالک‌های هدایت جت^۳ استفاده می‌شود. در حالت جت عکس‌العملی نیز نازل‌هایی در راستاهای مختلف تعبیه شده که توسط موتور یا

عکس‌العملی یا تراسترها، براساس متغیرهای مختلف، دسته‌بندی‌های گوناگونی دارد. از منظر نوع گاز مورد تغذیه، تراسترها به دو نوع گاز سرد و گاز گرم تقسیم می‌شوند. گاز مذکور نیز یا از یک منبع تغذیه جداگانه یا از محصولات حاصل از احتراق موتور تأمین می‌گردد. هر شیر (تراستر) متشکل از یک منبع تغذیه گاز، نازل (عمدتاً همگرا - واگرا)، پینتل یا متحرک درون نازل، و یک محرک الکترومکانیکی^۴ بوده که این موتور وظیفه به حرکت درآوردن پینتل را برعهده دارد. البته در برخی از نمونه‌ها نیز به جای پینتل از یک دیافراگم متحرک در گلوبی نازل (بخشی از شیر) استفاده می‌شود که اثر عملکردی آن شبیه پینتل مذکور خواهد بود. با حرکت پینتل، میزان ورود گاز از گلوبی نازل تغییر کرده، برحسب این تغییر، میزان تراست تولیدی نیز به‌منظور انجام مأموریت تغییر خواهد کرد. بنابراین از مهمترین بخش‌های طراحی این‌گونه از شیرها (تراسترها)، طراحی پینتل و پروفیل نازلی است که پینتل درون آن به حرکت درآمده و منجر به باز و بسته شدن آن شیر می‌شود.

در زمینه طراحی و ساخت تراسترهای مورد استفاده در سامانه‌های مختلف فضایی، پژوهش‌های فراوانی در کشور انجام شده است. بهرامی و خسروشاهی (۱۳۸۹)، در پژوهشی به ارائه روابط حاکم بر طراحی هندسه نازل یک تراستر گاز سرد و تهیه نرم افزار طراحی این هندسه پرداخته‌اند که در نهایت به ارائه یک نرم‌افزار جهت طراحی هندسه بهینه‌ای از این نوع تراستر منجر شده است [۲]. موسوی و همکاران (۱۳۹۳) نیز در پژوهشی به تست سخت‌افزار در حلقه سامانه کنترل وضعیت ماژول زیرمداری با تراسترهای گاز سرد پرداخته‌اند و بنابراین بیشترین تلاش روی سخت‌افزار تست متمرکز شده است [۳]. میرشمس و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی به طراحی، ساخت و آزمون نمونه مهندسی رانشگر گاز سرد جهت به‌کارگیری در شبیه‌ساز سه درجه آزادی دینامیک وضعیت ماهواره پرداخته‌اند [۴]. تحسینی و موسوی (۲۰۱۳) نیز به بررسی یک نمونه پینتل ولو (مشابه سیستم عملکردی تراستر مورد بحث در این پژوهش) با تراستی در حدود ۳۰۰ نیوتن پرداخته‌اند [۵]. هدف از پژوهش آنها، بررسی رفتار جریان ناپایا بر اثر حرکت پینتل (عملگر) در یک نازل همگرا - واگرا به‌کمک معادلات ناویر استوکس بوده است. همچنین بررسی اثر سرعت‌های مختلف حرکت پینتل و نیز تأثیر محل قرارگیری پینتل بر عدم تعادل جریان نیز از دیگر دستاوردهای این پژوهش

است. در زمینه تراستر گاز گرم فعالیت پژوهشی قابل توجهی در داخل کشور صورت نگرفته است. دنگ و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی عددی یک نمونه پینتل ولو سوپرسونیک پرداخته‌اند. در این پژوهش، آنها به بررسی ویژگی‌های نازل مذکور و نیز میزان تراست حاصل از تغییر مکان پینتل، در یک دبی جرمی ثابت اقدام کرده‌اند [۶]. نزدیکترین پژوهش به تحقیق صورت‌گرفته در این مقاله، پژوهش دنگ و همکاران است که البته تفاوت‌های عمده‌ای چون نوع گاز گرم مورد استفاده، میزان تراست تولیدی، فشار مخزن و ابعاد تراستر دارد. ماکلید و همکاران (۲۰۰۹) نیز در پژوهشی به توسعه یک کد ریاضی به‌منظور طراحی و تحلیل عملکرد تراسترهای سوخت تک‌مؤلفه‌ای در کاربردهای فضایی پرداخته‌اند. این کد بر مبنای سوخت رایج هیدرازین^۵ نوشته شده است [۷]. وو و همکاران (۲۰۱۶) به‌کمک دینامیک سیالات محاسباتی^۶ به بررسی آثار واکنشی سوخت به‌هنگام خروج از نازل تراستر گاز سرد با توان تولید ۶۰ نیوتن تراست پرداخته‌اند. آنها برای این منظور از ترکیب اکسیژن و هیدروژن با یک نسبت مشخص برای تأمین سیال خروجی پرفشار در یک محفظه خلأ استفاده کردند و بررسی‌های عینی و عددی خود را ثبت نمودند [۸]. بوید (۲۰۰۵) در پژوهشی به جایگزینی تراسترهای الکتریکی به‌جای شیمیایی در کاربردهای هوافضایی اقدام نموده است. وی در این پژوهش به بررسی پیشرفت در زمینه ساخت این نوع از تراسترها و نیز جایگاه ویژه محاسبات عددی در این زمینه پرداخته است [۹].

هدف از پژوهش حاضر، طراحی کلاسی از یک تراستر گاز گرم با وجود قیود مشخصی در اندازه بزرگترین قطر و طول نازل است که پس از ساخت، قادر به تحمل شرایط دمایی است و با انجام تست تجربی تراست مورد نظر را فراهم آورد. در نهایت نیز نتایج تراست تولیدی از تست تجربی با نتایج تراست حاصل از شبیه‌سازی مقایسه گردد. با توجه به هدف مذکور، می‌توان از نوع گاز گرم بودن این تراستر و در نتیجه محدودیت‌های مختلف مرتبط با آن (از جمله دمای کاری، سایش در دمای بالا و فشار مخزن)، همچنین میزان تراست تولیدی، طراحی براساس محدودیت‌های ابعادی از جمله طول و قطر بزرگ نازل (از نظر موقعیت قرارگیری) و ارتفاع کاری را از مزایای این پژوهش نسبت به پژوهش‌های مشابه برشمرد. در این تحقیق تمامی روش‌های طراحی ارزیابی و بهترین روش طراحی انتخاب شد. همچنین

بررسی پارامتریک بر مشخصه‌های مؤثر در طراحی نازل نیز به‌طور کامل انجام و در نهایت تراستر مذکور ساخته و تست شد.

۲. شبیه‌سازی عددی

۲-۱. روش‌های مورد بررسی در طراحی نازل فراصوت

روش‌های گوناگونی برای طراحی نازل فراصوت^۷ وجود دارد که در این تحقیق به‌منظور طراحی این شیر سه روش طراحی معکوس^۸، روش مشخصه‌ها و روش حدس و اصلاح مورد بررسی قرار گرفت. از بین روش‌های مذکور، روش طراحی به‌کمک حدس و اصلاح انتخاب شد. روش طراحی معکوس از روش‌های پرکاربرد است و عموماً در مجراهای ورودی موتور یا توربوماشین‌ها استفاده می‌شود. در این پژوهش به‌دلیل وجود پینتل، شبیه‌سازی با این روش دقت قابل قبولی نداشت و جواب‌های مناسبی از این روش حاصل نشد. اشکال دیگر این روش در نظر نداشتن لزجت بود که در این تحقیق بسیار مهم و تأثیرگذار است [۱۰]. روش مشخصه‌ها نازل‌های بسیار ایده‌آل و با کارایی بالا را طراحی می‌کند، اما اشکال بزرگ آن نبود قید روی طول نازل است. بنابراین، روش مذکور نیز کفایت لازم برای حصول نتایج مناسب در این پژوهش را ندارد. عموماً در طراحی نازل‌های تونل باد از این روش استفاده می‌شود. همچنین در نظر نداشتن لزجت و فرض دوبعدی بودن از دیگر معایب این روش است که موجب شده است تا جواب‌های مناسبی حاصل نشود [۱۱]. با توجه به این نقاط ضعف، به‌منظور طراحی بهتر شیر (تراستر) مورد هدف طراحی، از روش سوم یعنی حدس و اصلاح استفاده شد که نتایج مناسبی را نیز به‌همراه داشت.

۲-۲. بیان مسئله

مشخصات مورد نظر این شیر در جدول ۱ آمده است. جریان ورودی به شیرها از طریق مخزنی تهیه شده که فشار آن ۱۰۰ بار و دمای آن ۲۵۰۰ درجهٔ کلوین است. بنابراین نوع شیر مورد هدف در این طراحی، یک شیر حاوی گاز گرم حاصل از محصولات احتراق است. سایر خصوصیات فیزیکی سوخت ورودی به این شیر در ادامه در جدول ۲ آمده است. ابتدا مسئله به دو بخش تقسیم و به‌طور مجزا بررسی شده است. بخش اول شامل طراحی نازل همگرای شیر (بخش فروصوت)^۹ و سپس پینتل بوده که به‌منظور ارائهٔ یک طرح مناسب، ابتدا اثر طول نازل همگرا بر عملکرد شیر

مورد بررسی قرار گرفت. به‌نظر می‌رسید طول نازل همگرا تأثیر چندانی بر عملکرد آن نداشته باشد، بنابراین نازل واگرا (فراصوت) طول بیشتری از شیر را به‌خود اختصاص خواهد داد که این بخش از شیر به نسبت بخش همگرا تأثیرگذارتر خواهد بود (برای اثبات این ادعا در ادامه بررسی‌هایی صورت گرفت). بنابراین در این قسمت به لحاظ اثرودینامیکی مشکل خاصی وجود نداشت، اما به دو دلیل محدودیت‌هایی اعمال شد که در ساخت این شیر باید مورد توجه قرار می‌گرفت:

۱. به‌دلیل وجود ناحیهٔ پرفشار در این بخش و با توجه به مواد مورد استفاده و محاسبات سازه‌ای، برای داشتن ضریب اطمینان مناسب و جلوگیری از ترکیدگی باید ضخامت مناسبی از شعاع شیر در این ناحیه به‌عنوان ضخامت بخش فلزی در نظر گرفته شود و از مابقی آن جریان عبور کند. البته تعیین دقیق ضخامت مورد نیاز جهت تحمل تنش‌های وارده نیازمند تحلیل‌های سازه‌ای دقیق است که این بخش مورد نظر این تحقیق نبوده است. با تکیه بر تجربه، ضخامت فلزی در حدود یک‌سوم شعاع شیر در نظر گرفته شد.

۲. به‌دلیل فشار و دمای بالا، امکان سایش و خوردگی پینتل و نازل وجود دارد. بنابراین نازل همگرا باید با قسمتی از پینتل همپوشانی داشته باشد تا پینتل قادر باشد در صورت خوردگی نیز مسیر جریان را مسدود کند. برای این منظور پینتل باید با بخشی از نازل همگرا هم‌شیب باشد تا در مواقع بحرانی، آب‌بند مناسب را ایجاد کند. گفتنی است تعیین میزان فرسایش یا خوردگی شیمیایی این شیر به تحلیل‌های دقیق نیاز دارد تا تدابیر مواد و سازه‌ای مناسب نیز اتخاذ شود. برای سادگی ساخت پینتل، منحنی آن به‌صورت خطی در نظر گرفته و نازل همگرا با آن تطبیق داده شد. شکل ۱ نمایی شماتیک از موارد مذکور را نشان می‌دهد.

جدول ۱. ابعاد و تراست مورد انتظار در شیر هدف طراحی

ارتفاع کاری (کیلومتر)	تراست (نیوتن)	ماکزیمم شعاع نهایی (میلی‌متر)	ماکزیمم طول (میلی‌متر)
۱۰۰	۲۶۰۰۰	۱۸۰	۴۲۰

جدول ۲. خصوصیات گاز ورودی در طراحی شیر هدف

ظرفیت گرمای ویژه (ژول بر کیلوگرم کلوین)	وزن مولکولی (گرم بر مول)	چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
۱۸۲۲/۶	۲۳/۸۶	۱۱/۵

همان‌طور که مشاهده شد، اثر هر یک از پارامترهای پنج‌گانه بر عملکرد شیر (تولید تراست) بررسی شد که نتایج به شرح زیر است:

(الف) شعاع گلوگاه: این پارامتر نقشی اصلی در تعیین دبی عبوری و در نتیجه تراست نهایی دارد.

(ب) پروفیل قسمت واگرا و طول آن: این پارامتر نقش مهمی در یکنواختی جریان خروجی دارد.

(ج) نسبت مقطع خروجی به مقطع گلوگاه: این نسبت نیز در تعیین ماخ خروجی نقش قابل توجهی دارد.

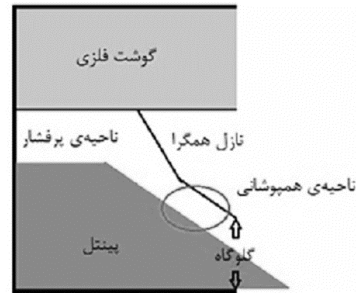
این سه پارامتر مهمترین عوامل در تعیین رفتار نازل هستند و با انتخاب صحیح آنها می‌توان به نازل مطلوب دست یافت. همان‌گونه که در شکل‌های ۲ تا ۵ مشخص است، دو پارامتر دیگر تأثیر کمتری در تراست دارند. گفتنی است در این پژوهش سعی شده است رفتار نازل تا حد زیادی مستقل از فشار خروجی باشد تا در سطح زمین قابل کالیبره باشد. همچنین برای حدس اولیه پروفیل، از نتایج برآمده از روش مشخصه‌ها استفاده شد که حدس اولیه مناسب‌تری خواهد بود؛ حلقه‌های حل بعدی طراحی، منحنی ساده‌تری را ارائه داد که به فرم کمائی از یک دایره بوده و کارایی مد نظر را خواهد داشت. از مزایای مهم این روش نسبت به سایر روش‌های مطرح شده می‌توان به دو مورد اشاره کرد:

۱. آثار لزجت در نظر گرفته شده است
۲. تمام ابعاد و اندازه‌ها همچنین پینتل تحت کنترل می‌باشند به‌منظور تسریع در روند شبیه‌سازی، فایل‌های ژورنال^{۱۱} مخصوصی در نرم‌افزار شبکه‌بندی گمبیت^{۱۱} و تحلیل فلونت^{۱۲} آماده شد که شبکه‌بندی و تحلیل را به‌صورت خودکار انجام داد.

۲-۴. مدل‌سازی و شبکه‌بندی

به‌منظور ایجاد مدل و شبکه‌بندی در این پژوهش از نرم‌افزار گمبیت استفاده شد. نوع شبکه‌بندی با سازمان بوده که موجب دقت بیشتر در جواب‌های حل می‌شود. نمونه‌ای از هندسه و شبکه تولید شده در شکل ۶ نمایش داده شده است [۱۳-۱۴].

معادلات حاکم، معادله پیوستگی، اندازه حرکت خطی و انتقال، یک کمیت اسکالر بوده‌اند که به روش حجم محدود گسسته‌سازی صورت گرفت. برای محاسبه فشار نیز از الگوریتم سیمپل^{۱۳} استفاده شد. اساس این روش نیز کاربرد معادله پیوستگی جهت به‌دست آوردن توزیع فشار است.



شکل ۱. نمایی شماتیک از نازل و پینتل در شیر

بخش دوم، شامل طراحی قسمت واگرایی نازل (فراصوت) بود که چون در این بخش جریان فراصوت است، با کوچکترین اختلال، جریان درون شیر دچار شوک ضربه‌ای شده و انرژی خود را از دست می‌دهد؛ در نتیجه نازل کارایی مطلوب نداشته و تراست مورد نظر نیز تولید نخواهد شد. در نتیجه طراحی پروفیل نازل در بخش واگرا بسیار حائز اهمیت خواهد بود.

۲-۳. معرفی روش حل مسئله

پس از آنکه از روش‌های طراحی معکوس و مشخصه‌ها جواب مناسبی برای مسئله حاصل نشد، روش حدس و اصلاح به‌عنوان آخرین راهکار مطرح شد [۱۲]. در این روش ابتدا یک حدس برای پروفیل نازل در نظر گرفته و سپس با استفاده از تحلیل عددی اعتبار آن سنجیده می‌شود. به‌منظور افزایش دقت، ابتدا تأثیر پارامترهای مختلف نازل روی عملکرد آن مورد سنجش و ارزیابی قرار گرفت. به‌طور کلی پنج پارامتر در عملکرد ائرو‌دینامیکی نازل (شیر) مؤثر خواهند بود که این عوامل عبارت‌اند از:

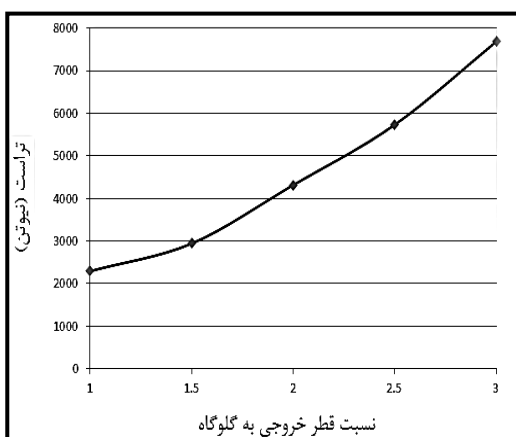
۱. قطر گلوگاه نازل (شیر)
۲. پروفیل و طول قسمت واگرا
۳. نسبت مقطع خروجی به گلوگاه شیر
۴. طول و پروفیل قسمت همگرایی شیر
۵. نسبت مقطع ورودی به گلوگاه

برای اطمینان از آثار این پنج پارامتر بر تراست حاصل از شیر، پنج آزمایش طراحی شد و مورد بررسی قرار گرفت. در هر آزمایش یک شیر با تراست مشخصی در حدود ۶۸۰۰ نیوتن (میزان تراست پایین‌تر فرض شد تا زمان حل کوتاه‌تر شود) در نظر گرفته شد تا اثر متغیرهای مذکور بر عملکرد شیر بررسی شود. برای این منظور با تغییر یک پارامتر و ثابت ماندن ۴ پارامتر دیگر و تحلیل عددی، اثر پارامتر مورد نظر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی‌ها در شکل‌های ۲ تا ۵ نمایش داده شده است.

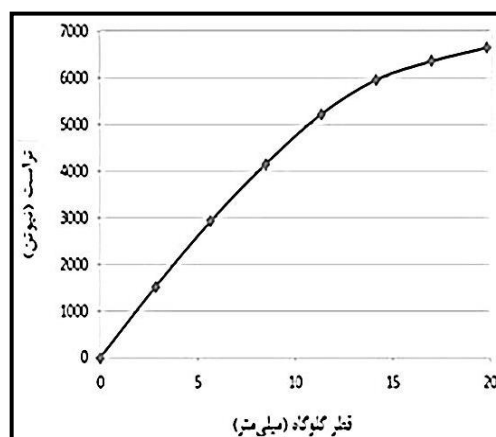
۵-۲. تنظیمات حلگر

به صورت ویژه برای کاربردهای هوافضا طراحی شده که شامل جریان‌های هم‌بسته می‌شود و نتایج خوبی را برای لایه‌های مرزی که در معرض گرادین‌های فشار مخالف‌اند نشان داده است. همچنین در بین کاربردهای توربوماشین هم محبوبیت پیدا می‌کند. مدل اسپالارت در شکل اصلی خود یک مدل با عدد رینولدز پایین است که باید اثر ویسکوزیته برای آن محدوده تحت تأثیر گرانروی در لایه‌های مرزی به طور مطلوبی از بین برود. با توانمندی‌های مذکور، این مدل می‌تواند بهترین انتخاب برای شبیه‌سازی‌های خام روی شبکه‌های درشت، که در آنها محاسبات دقیق آشفستگی جریان خیلی حیاتی نیست، باشد. همچنین گرادین‌های متغیر منتقل شده نزدیک دیواره در این مدل بسیار کوچکتر از گرادین‌های متغیرهای منتقل شده در مدل‌های $K-\omega$ یا $K-\epsilon$ هستند. این ممکن است باعث شود وقتی شبکه‌های غیرلایه‌ای برای دیوارهای نزدیک استفاده می‌شوند مدل حساسیت کمتری نسبت به خطای عددی داشته باشد [۱۹].

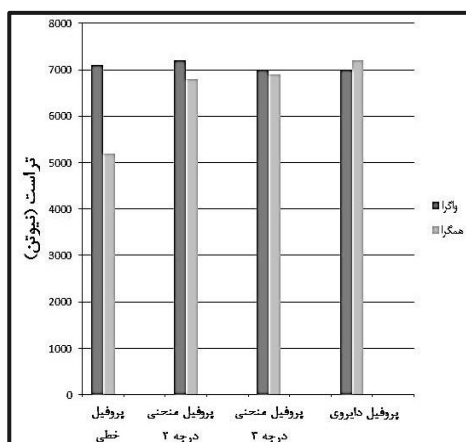
در این پژوهش، برای تحلیل عددی از نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است. معادلات به روش حجم محدود حل و دقت آن تا ۶ رقم اعشار لحاظ شده است. معادلات حاکم بر مسئله، معادلات ناویر - استوکس در حالت سه‌بعدی و پایاست که به روش فشار پایه^{۱۴} و چگالی پایه^{۱۵} و با دقت مرتبه دو مجزاسازی شده است. برای کوپلینگ فشار و سرعت نیز از روش سیمپل و ای. یو. اس. ام.^{۱۶} استفاده شد. برای محاسبه اغتشاشات جریان از مدل توربولانسی اسپالارت آلماراس^{۱۷} استفاده شده که یک مدل عمومی است و جواب‌های نسبتاً مناسبی ارائه می‌دهد. این مدل، یک مدل تک‌معادله‌ای و نسبتاً ساده است که یک معادله انتقال مدل شده را برای ویسکوزیته جریان گردابی جنبشی (آشفستگی) حل می‌کند. این امر یک رده‌بندی نسبتاً جدید از مدل‌های تک‌معادله‌ای ارائه می‌کند که در آن نیازی به محاسبه یک مقیاس طولی در رابطه با ضخامت لایه برشی محلی نیست. مدل مذکور



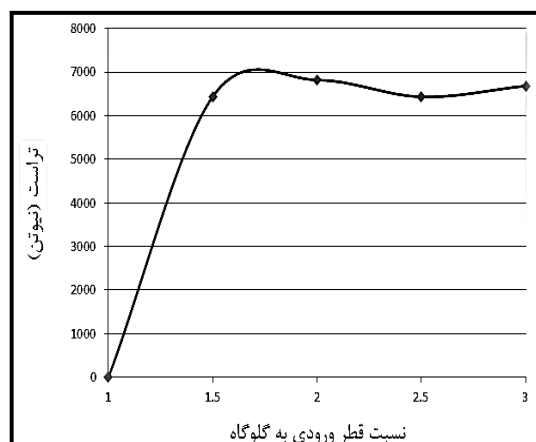
شکل ۳. بررسی نسبت اثر قطر خروجی به قطر گلوگاه بر تراست



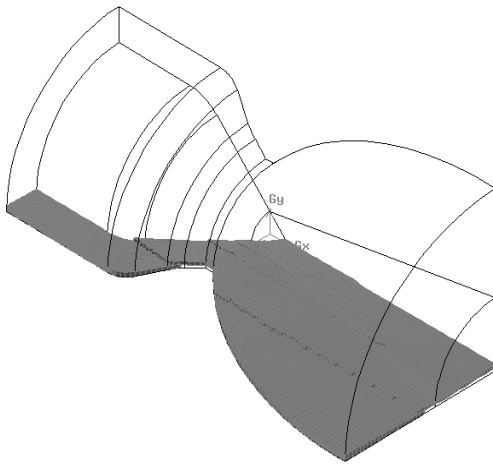
شکل ۲. بررسی اثر قطر گلوگاه بر تراست



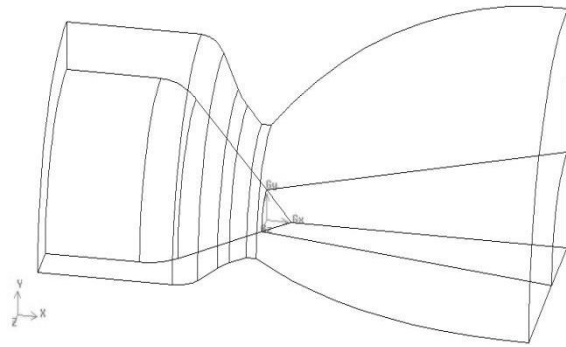
شکل ۵. بررسی اثر پروفیل قسمت همگرا و واگرا بر تراست



شکل ۴. بررسی اثر نسبت قطر ورودی به قطر گلوگاه بر تراست



(ب)



(الف)

شکل ۶. نمایی از الف) نمونه هندسه تولیدی در گمیت؛ ب) شبکه تولیدی با مش با سازمان در گمیت

پینتل در مکان‌های مختلفی از محل قرارگیری آن در نازل، در شکل ۸ نمایش داده شده است. پینتل طراحی شده نیز در شکل ۹ نمایش داده شده است. در شکل ۱۰ نیز پینتل درون شیر نشان داده شده است. در ادامه، شکل‌ها و نمودارهای حاصل از تحلیل عددی ارائه شده تا رفتار جریان داخل شیر مشخص شود. شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نیز کانتورهای سرعت، فشار و دما را در حالت‌های مختلفی از میزان جابه‌جایی پینتل به میزان ۴، ۸، ۱۶ و ۲۸ میلی‌متری نشان می‌دهند. همچنین در انتها، جدول نمودارهای ترسیم شده در اشکال مذکور ارائه شده است. نتایج حاصل از محل پینتل شیر نیز در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین نتایج حاصل از کانتورها در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نمایش داده شده است.

بنابراین مدل منتخب می‌تواند پاسخگویی مناسبی به نیازهای مرتبط با مدل کردن لزجت داشته باشد. شرایط اولیه حل، مطابق جدول ۳ و شرایط مرزی لحاظ شده، مطابق جدول ۴ اعمال شد. همچنین ملاک توقف حل کاهش باقی‌مانده‌ها تا 10^{-4} در نظر گرفته شد.

۳. نتایج شبیه‌سازی

پس از تکرار بیش از ۱۱۰ حلقه حل و آنالیز آنها در نهایت طرح شکل ۷ برای شیر مورد هدف در نظر گرفته شد. این طرح به لحاظ ائرودینامیکی تراست مورد نظر را با ضریب اطمینانی در حدود ۱/۲ (حدود ۳۱۴۶۰ نیوتن) فراهم کرد. نیروی اعمالی بر

جدول ۳. برخی دیگر از شرایط گاز ورودی

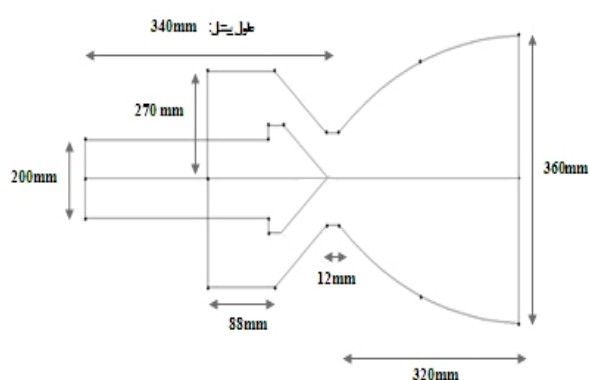
عنوان شرط ورودی	نوع و میزان شرط
سرعت (متر بر ثانیه)	ساکن
چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	گاز ایده‌آل
دما (درجه کلوین)	۲۵۰۰
فشار سکون (پاسکال)	۱۰۰۰۰۰۰

جدول ۴. شرایط مرزی

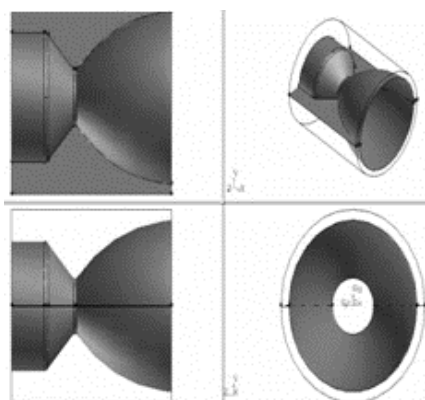
مرز انتخابی	نوع شرط مرزی
صفحه ورودی شیر	ورودی فشار یکسان
صفحه خروجی شیر	خروجی فشار یکسان
دیواره‌های اطراف شیر	دیوار بدون لغزش
پینتل	دیوار بدون لغزش
صفحات جانبی	متقارن

جدول ۵. پارامترهای مهم نسبت به موقعیت پینتل برای شیر

محل پینتل (میلی متر)	دبی (کیلوگرم بر ثانیه)	سرعت متوسط خروجی (متر بر ثانیه)	فشار متوسط خروجی (پاسکال)	تراست کل (نیوتن)	نیروی وارد بر پینتل (نیوتن)
۰	۰	۰	۰	۰	۱۲۸۰۰/۴
۴	۲/۹۶	۲۲۷۹/۴۹	۲۲۳۷۶/۳۴	۷۲۰۸/۱	۲۸۴۷/۸
۸	۵/۸	۲۳۴۱/۸۵	۴۵۷۰۳/۵۹	۱۳۹۳۹/۶	-۱۵۱۴/۷
۱۶	۱۰/۲	۲۲۶۳/۱۹	۷۴۲۹۵/۸۱	۲۴۷۲۰/۳	-۸۷۶۹/۸
۲۸	۱۳/۱	۲۲۵۴/۵۲	۹۳۵۱۴/۶۳	۳۱۴۵۹/۲	-۱۲۸۳۷/۶

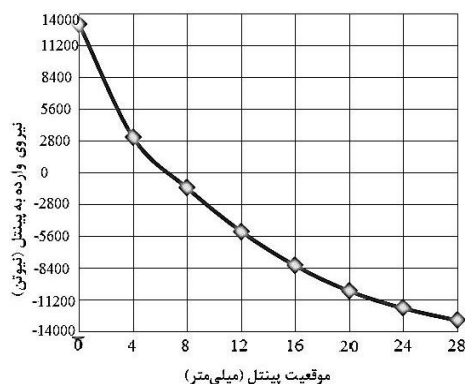


(ب)

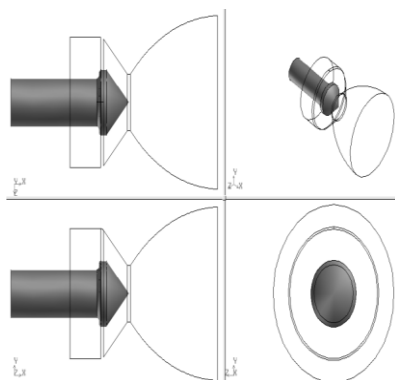


(الف)

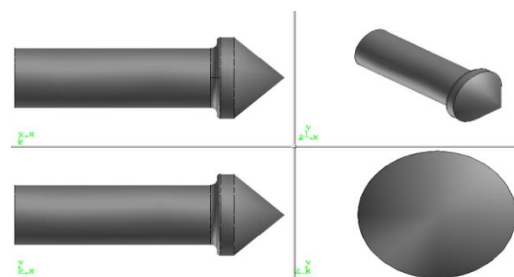
شکل ۷. نمایی از الف) طرح شیر مورد هدف؛ ب) طرح شماتیک حاصله به همراه ابعاد آن



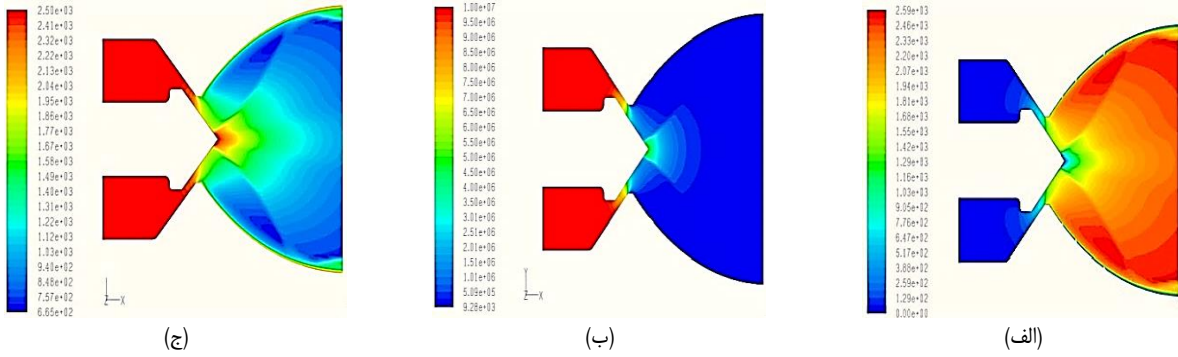
شکل ۸. نمودار نیروی اعمالی به پینتل بر حسب موقعیت پینتل



شکل ۱۰. پینتل درون شیر

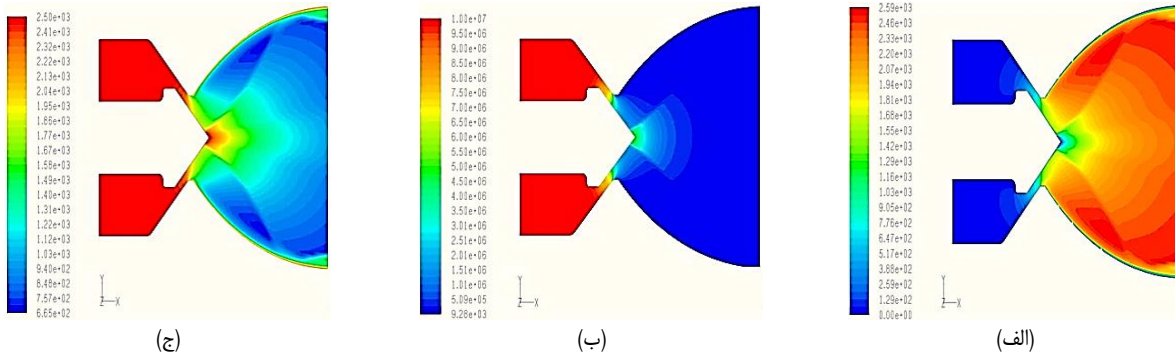


شکل ۹. طرح پینتل شیر مورد هدف طراحی



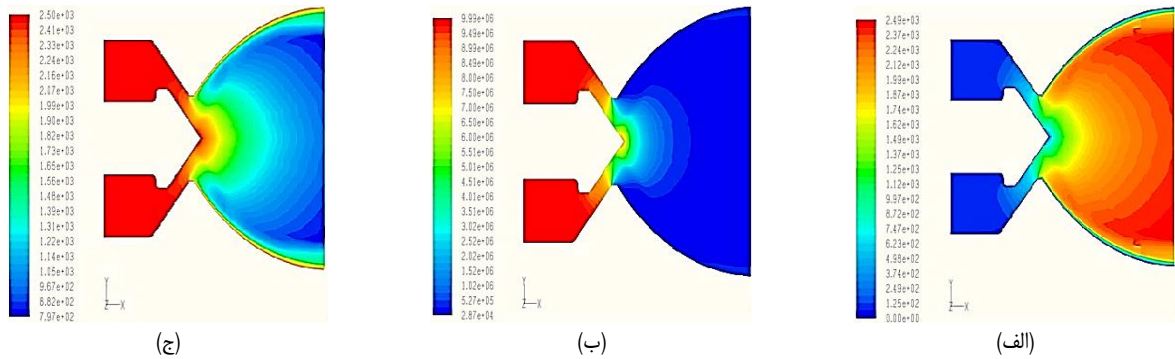
شکل ۱۱. نمایی از کانورهای

(الف) سرعت به ازای جابه‌جایی ۴ میلی‌متری پینتل؛ (ب) فشار به ازای جابه‌جایی ۴ میلی‌متری پینتل؛ (ج) دما به ازای جابه‌جایی ۴ میلی‌متری پینتل



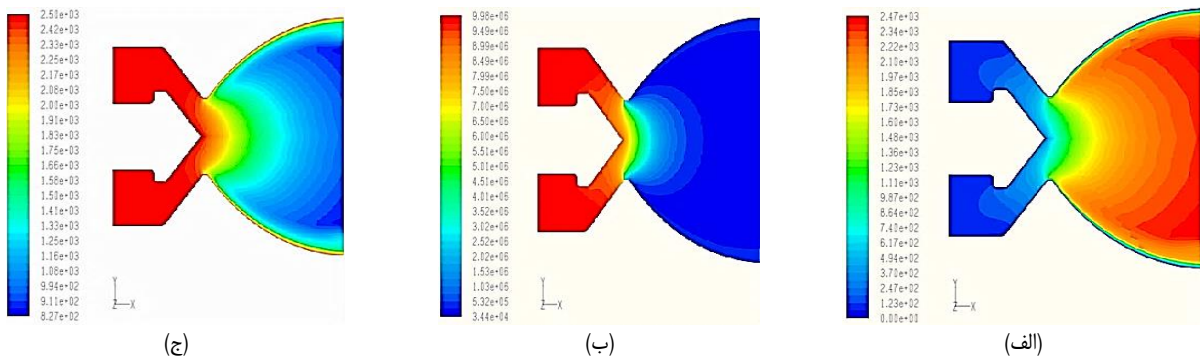
شکل ۱۲. نمایی از کانورهای

(الف) سرعت به ازای جابه‌جایی ۸ میلی‌متری پینتل؛ (ب) فشار به ازای جابه‌جایی ۸ میلی‌متری پینتل؛ (ج) دما به ازای جابه‌جایی ۸ میلی‌متری پینتل



شکل ۱۳. نمایی از کانورهای

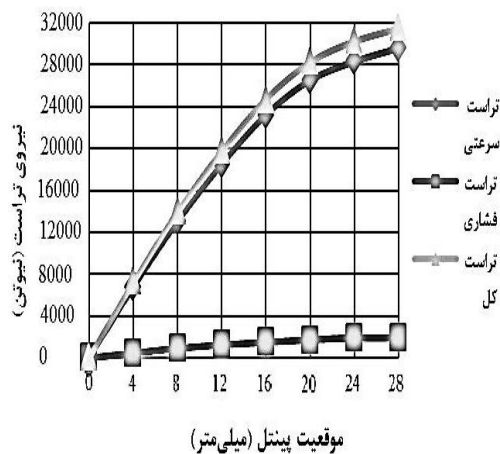
(الف) سرعت به ازای جابه‌جایی ۱۶ میلی‌متری پینتل؛ (ب) فشار به ازای جابه‌جایی ۱۶ میلی‌متری پینتل؛ (ج) دما به ازای جابه‌جایی ۱۶ میلی‌متری پینتل



شکل ۱۴. نمایی از کانورهای

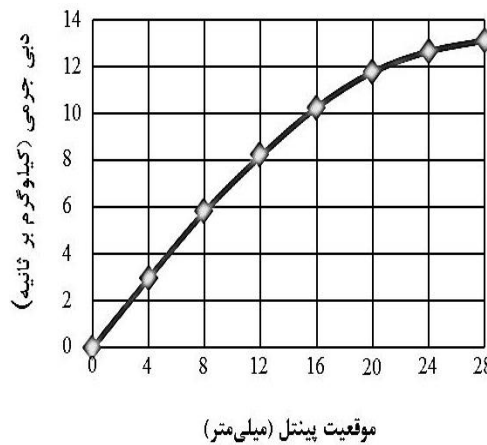
(الف) سرعت به ازای جابه‌جایی ۲۸ میلی‌متری پینتل؛ (ب) فشار به ازای جابه‌جایی ۲۸ میلی‌متری پینتل؛ (ج) دما به ازای جابه‌جایی ۲۸ میلی‌متری پینتل

طراحی، نحوه نصب شیر است. زاویه ورود گاز داغ به درون شیر ممکن است منجر به ایجاد آثار متفاوت بر تراست حاصل، فرسایش شیر و یا پینتل درون شیر شود. نتایج این بررسی نیز در ادامه ارائه شده است.



شکل ۱۶. نمودار تراست بر حسب موقعیت پینتل

همان طور که بیان شد نیروی اعمالی به پینتل بر حسب جابه‌جایی آن تغییر می‌کند. در جدول ۵، میزان نیروی اعمالی به پینتل در موقعیت‌های متفاوت از محل قرارگیری آن درون شیر نشان داده شده است. از دیگر نکات مورد نیاز به بررسی در



شکل ۱۵. نمودار دبی خروجی بر حسب موقعیت پینتل

در شکل‌های ۱۹ تا ۲۱ به صورت کیفی نمایش داده شده‌اند که تفاوت چندانی با حالت بدون لوله وجود ندارد.

برای بررسی دقیق‌تر اثر زاویه ورودی، حالت دیگری برای شیر مذکور تحلیل شد که در آن یک لوله با زاویه ۹۰ درجه شیر را تغذیه می‌کرد که در شکل ۲۲ نمایش داده شده است.

نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که زاویه ورود تأثیرگذار بوده و سبب افت انرژی و کاهش نیروی تراست می‌شود. در نتیجه بهترین زاویه برای لوله‌های ورودی، صفر درجه است که ضریب اطمینان ۱/۲ را ایجاد کرده و بدترین حالت از نظر میزان تراست تولیدی، زاویه ۹۰ درجه است که ضریب اطمینان ۱/۱ را ایجاد خواهد کرد. سایر حالت‌ها نیز در بازه صفر تا ۹۰ درجه خواهد بود. در زوایای مختلف، تحلیل ائرودینامیکی و سازه‌ای صورت گرفت. طبق تحلیل‌های انجام‌شده، فرسایش در زوایای پایین‌تر از ۳۰ درجه در حد مجاز نبوده، لذا در زوایای بالای ۳۰ درجه، بیشترین تراست را زاویه ۳۰ درجه خواهد داشت. در نتیجه این زاویه به‌عنوان زاویه بهینه در ورودی در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه طبق تحلیل‌های خوردگی، افزایش زاویه لوله تغذیه ورودی، سبب کاهش خوردگی گلوبی شیر می‌شود، می‌توان زاویه ۳۰ درجه را به‌عنوان حالت بهینه در نظر گرفت. نتایج حالت اتصال ۹۰ درجه در شکل‌های ۲۳ تا ۲۵ نمایش داده شده است.

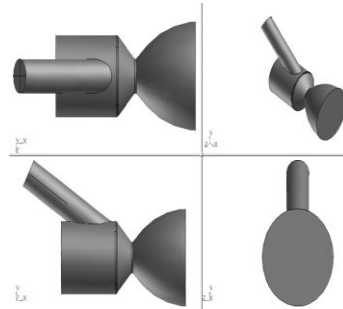
۴. بررسی زاویه اتصال لوله تغذیه گاز داغ

با توجه به اینکه گاز داغ از طریق لوله‌های رابط به شیر می‌رسد، بررسی اثر زاویه اتصال لوله تغذیه به شیر حائز اهمیت است. به‌منظور بررسی این اثر، یک حالت از شیر در موقعیت خاصی از جابه‌جایی پینتل (معادل با ۲۸ میلی‌متر) تحلیل شد. در وضعیت مذکور، شیر با یک لوله به قطر ۶ سانتی‌متر و زاویه تغذیه ۳۰ درجه مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه نتایجی که در جدول ۶ بین این حالت و حالت قبلی (زاویه ورودی گاز در صفر درجه) ارائه شده است، مشاهده شد که جواب‌ها چندان تحت تأثیر قرار نگرفته‌اند. تراست مجموعاً در حدود ۴/۷ درصد کاهش یافت، همچنین نیروی وارده به پینتل ۷/۲ درصد بهبود یافته است. با توجه به در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۱/۲ در طراحی (در حالت بدون لوله رابط) مشکل خاصی در عملکرد شیر به‌وجود نمی‌آید و در این حالت ضریب اطمینان در حدود ۱/۱۶ خواهد بود که با این میزان تراست، ضریب اطمینان مذکور میزان قابل قبولی است.

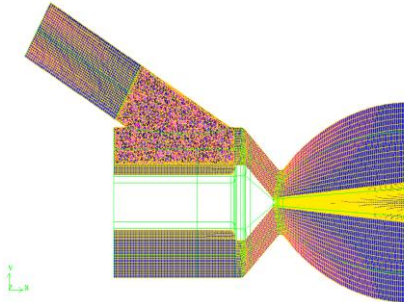
برای انجام این تحلیل به‌دلیل وجود لوله، دیگر نمی‌توان از شرایط مرزی متقارن بهره گرفت و باید شیر به‌طور کامل مدل‌سازی شود. مدل مذکور و شبکه‌بندی انجام‌شده روی آن در شکل ۱۸ ارائه شده است. همچنین کانتورهای سرعت، فشار و دما

جدول ۶. بررسی اختلاف بین دو وضعیت تغذیه شیر (صفر و ۳۰ درجه)

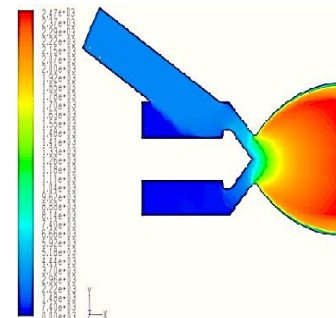
نیروی وارده به پینتل (نیوتن)	تراست کل (نیوتن)	سرعت متوسط خروجی (متر بر ثانیه)	دبی جرمی (کیلوگرم بر ثانیه)	وضعیت (میلی متر)
-۱۲۸۳۷/۶	۳۱۴۵۹/۲	۲۲۵۴/۵۲	۱۳/۱	بدون لوله تغذیه
-۱۱۹۱۳/۳	۲۹۹۸۰/۶۱	۲۲۵۰/۰۲	۱۲/۵۱	با لوله
۷/۲	۴/۷	۰/۱	۴/۵	درصد اختلاف



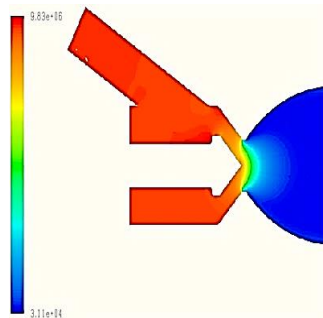
شکل ۱۷. هندسه مدل شده برای حالت شیر متصل به لوله رابط



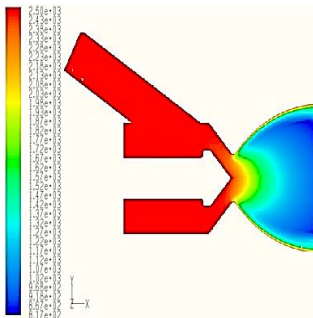
شکل ۱۸. شبکه بندی شیر متصل به لوله رابط با زاویه ۳۰ درجه



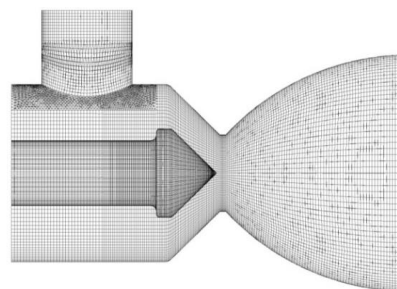
شکل ۱۹. کانتور سرعت شیر متصل به لوله رابط با زاویه ۳۰ درجه



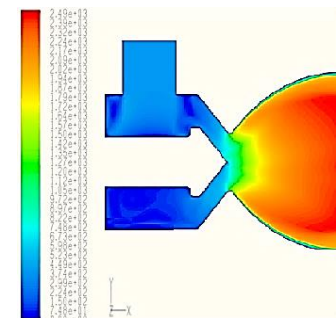
شکل ۲۰. کانتور فشار شیر متصل به لوله رابط با زاویه ۳۰ درجه



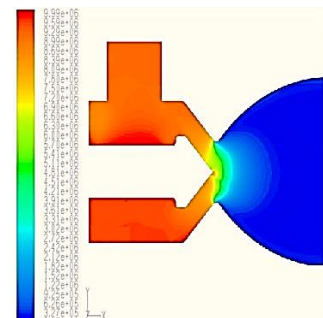
شکل ۲۱. کانتور دما شیر متصل به لوله رابط با زاویه ۳۰ درجه



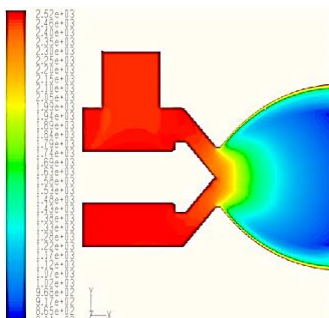
شکل ۲۲. شبکه بندی شیر متصل به لوله رابط با زاویه ۹۰ درجه



شکل ۲۳. کانتور سرعت شیر متصل به لوله رابط با زاویه ۹۰ درجه



شکل ۲۴. کانتور فشار شیر متصل به لوله رابط با زاویه ۹۰ درجه



شکل ۲۵. کانتور دما شیر متصل به لوله رابط با زاویه ۹۰ درجه

برای محافظت در برابر جریان گاز داغ با دمای در حدود ۲۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، پروفیل داخلی و گلویی از جنس گرافیت با دانسیته بالا ساخته شد. به منظور افزایش مقاومت در برابر نیروهای مکانیکی و نیز سهولت در مونتاژ، یک پوسته فلزی روی پروفیل داخلی مذکور قرار گرفت و در بین آنها عایق مناسب از جنس مواد فناشونده قرار داده شد. شکل ۲۶ شیر ساخته شده را در نماهای مختلف نشان می‌دهد. همچنین نمایی از شیر در حین تست در دو زمان مختلف در شکل ۲۷ نمایش داده شده است. مهمترین اجزاء استند تست مورد استفاده عبارتند از: مخزن ذخیره سوخت، صفحه تغذیه، فشارسنج‌ها و نیروسنج‌ها، فیکسچر نگهدارنده شیر، لوله و اتصالات.

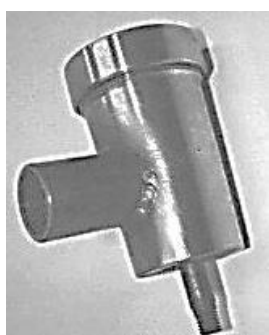
با توجه به نتایج به دست آمده از تراست خروجی بین سه حالت قبل، نتایج به صورت خلاصه در جدول ۷ ارائه شده است.

۵. مقایسه با نتایج تجربی

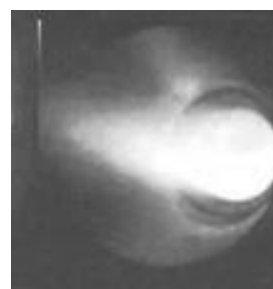
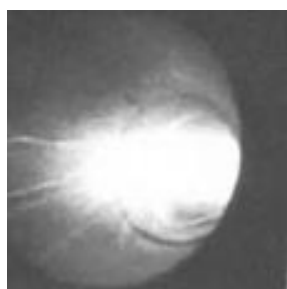
پس از طراحی پروفیل داخلی شیر مورد نظر، نمونه‌ای از آن طبق طراحی انجام شده ساخته شد. به دلیل انتخاب فرایند ساده‌تری از مونتاژ و نیز برخی از محدودیت‌های استند تست تجربی (محل نصب تراستر و محل ذخیره سوخت)، نمونه انتخابی جهت ساخت، بدترین وضعیت ایجاد تراست را خواهد داشت. این نمونه دارای لوله تغذیه‌ای با زاویه ۹۰ درجه بود؛ هدف از این تست نیز بررسی بدترین شرایط به منظور ایجاد حداقل تراست ۲۶۰۰۰ نیوتن بود.

جدول ۷. نتایج تراست حاصله مابین سه حالت از زاویه لوله تغذیه به شیر

تراست در حالت با لوله تغذیه ۹۰ درجه (نیوتن)	تراست در حالت با لوله تغذیه ۳۰ درجه (نیوتن)	تراست در حالت بدون لوله تغذیه (نیوتن)
۲۹۰۶۸/۳	۲۹۹۸۰/۶۱	۳۱۴۵۹/۲



شکل ۲۶. شیر ساخته شده در این پژوهش



شکل ۲۷. نمایی از شیر در حین تست در دو زمان مختلف

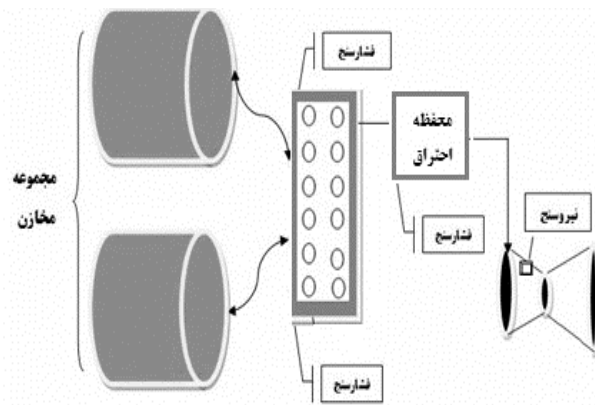
موقعیت‌های مختلف روی مخازن و صفحه انژکتور نصب می‌شود. جهت اندازه‌گیری نیرو و تراست نیز نیروسنج‌هایی در نزدیکی شیر نصب می‌شوند. برای نصب این لودسل‌ها باید کالیبراسیون و نیز نصب آنها به گونه‌ای انجام شود که نیروی محوری اعمالی را صفر نشان دهد و فقط نیروهای جانبی اندازه‌گیری شود. نحوه نصب

سوخت از طریق مخازن تحت فشار ذخیره شده و به کمک اتصالات بارگذاری می‌شود. تعداد یا بزرگی مخازن به میزان زمان مورد استفاده جهت انجام تست بستگی دارد. سوخت مخازن بر سر صفحه تغذیه آمده و از آنجا پس از وقوع احتراق، از شیر را با فشار عبور می‌کند. به دلیل حساسیت فشار، چند فشارسنج در

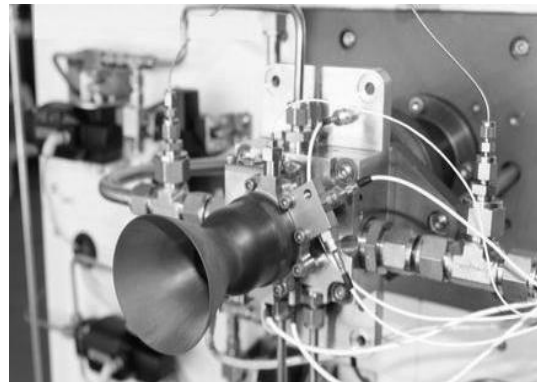
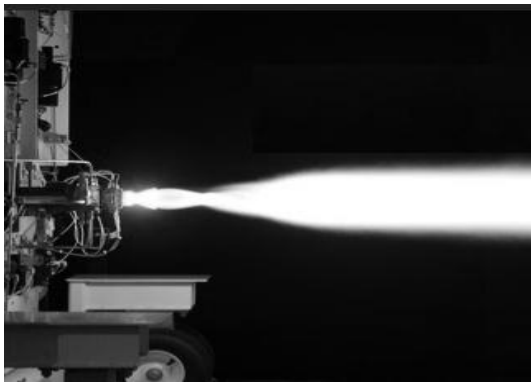
قابل قبول بین نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی بر قرار است. بیشترین درصد خطای پدیدآمده میان این دو، کمتر از ۱۰ درصد بود که برای طراحی نازل این میزان از خطا قابل قبول است. همچنین تراست ایجادشده در تست تجربی بیش از ۲۶۰۰۰ نیوتن بود. با افزایش جابه‌جایی پینتل، دبی افزایش یافته و فیزیک حاکم بر شیر دارای پیچیدگی‌های زیادی نظیر اغتشاش زیاد و تداخل لایه مرزی با شوک‌های قوی می‌شود که خطای حل عددی در این پدیده‌ها افزایش می‌یابد. همچنین در نیروهای زیاد خطای سیستم اندازه‌گیری نیز روبه افزایش گذاشته و مزید بر علت می‌باشد.

شیر با توجه به تجهیزات جانبی مربوط به اندازه‌گیری نیروها و فشار و نیز محل نصب دیگر تجهیزات، دارای محدودیت‌هایی بوده و بنابراین تراستر مذکور به صورت ۹۰ درجه در ورود شکل ۲۸ شماتیکی از استند تست را نشان می‌دهد. نمونه مشابه به این استند در شکل ۲۹ نمایش داده شده است.

در نهایت این شیر به صورت تجربی تست شد و میزان تراست تقریبی خروجی برحسب موقعیت قرارگیری پینتل محاسبه و نمودار این تغییرات استخراج شد که در شکل ۳۰ نمایش داده شده است. نمودار حاصل از تست تجربی با نمودار حاصل از نتایج شبیه‌سازی مقایسه شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تطابق



شکل ۲۸. نمایی شماتیک از استند تست تجربی



شکل ۲۹. نمونه‌ای مشابه با استند مورد استفاده در تست

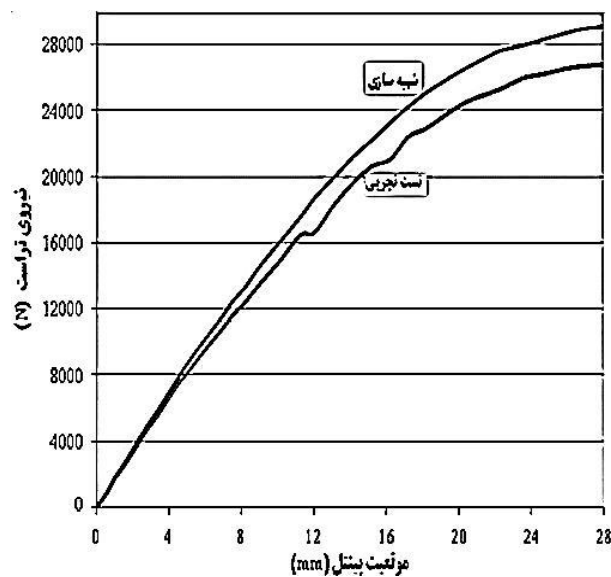
در طراحی سازه لحاظ شود تا مقاومت سازه شیر و پینتل مورد تأیید قرار گیرد. همچنین مشاهده شد که هرچه پینتل در موقعیت دورتری قرار گیرد، میزان تراست تولیدی بیشتر شده؛ که دلیل این امر ایجاد دبی بالاتری از سوخت می‌باشد. سیر نزولی نیروی اعمالی به پینتل برحسب موقعیت پینتل نیز از دیگر نتایج می‌باشد. از دیگر نتایج این پژوهش، کاهش میزان تراست حاصل، بر اثر

۶. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج ارائه‌شده در بخش قبل به‌وضوح مشخص است که با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۱/۲ در طراحی ائرودینامیکی، اگر پینتل در نزدیکی موقعیت ۱۶ میلی‌متری از گلوگاه قرار گیرد، تراست مورد نظر تأمین می‌شود. از طرفی در بحرانی‌ترین حالت، نیروی اعمالی به شیر و پینتل در حدود ۱۳۰۰۰ نیوتن بوده که باید

با توجه به هدف طراحی بر مبنای ایجاد تراست ۲۶۰۰۰ نیوتن، تست نمونه ساخته شده، با وجود انتخاب بدترین نوع شیر از نظر زاویه ورودی، تراستی بیش از ۲۶۰۰۰ نیوتن ایجاد شد. انتخاب جنس داخلی از نوع گرافیت با دانسیته بالا و نیز نحوه عایق کاری امکان مقاومت در برابر گاز داغ، مقاومت در برابر شوک حرارتی و بالا نرفتن بیش از حد دما در پوسته فلزی را ایجاد نمود. همین طور وجود پوشش فلزی روی مجموعه مذکور قابلیت مقابله در برابر تنش های مکانیکی را به خوبی ایجاد نمود.

افزایش زاویه لوله تغذیه سوخت به شیر می باشد که البته با افزایش این زاویه، بر اساس تحلیل های خوردگی، میزان فرسایش گلویی شیر کاهش می یابد. بنابراین با توجه به محدودیت ها و نوع کاربرد و میزان تراست مورد نیاز باید یک میزان بهینه برای زاویه لوله ورودی تغذیه به شیر انتخاب و تحلیل کرد. نتایج حاصل از شبیه سازی (شیر با لوله تغذیه ۹۰ درجه) تطابق قابل قبولی با نتایج تست تجربی داشت؛ به گونه ای که میزان این اختلاف در بدترین شرایط (از نظر میزان تولید تراست) کمتر از ۱۰ درصد بود.



شکل ۳۰. مقایسه نتایج تراست حاصل از شبیه سازی عددی و نتایج تجربی بر حسب موقعیت پینتل

۷. مآخذ

- [1] National Aeronautics and Space Administration, <http://www.nasa.gov> (accessed 7 December 2017).
- [2] S. M. Bahrami Bidani, R. Khosroshahi, The Software for Geometric Design of the Ground and Space Nozzles of Cold Gas Thruster, 10th Iranian Aerospace Society Conference, 2010 (In Persian فارسی).
- [3] S. F. Mousavi, J. Roushaniyan, R. Emami, Hardware Test on the Loop of the Control System of the Sub-Orbit Module with Cold Gas Thrusters, *Journal of Modarres Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 10, pp. 177-186, 2015 (In Persian فارسی).
- [4] M. Mirshamsi, M. Ghobadi, H. Taei, Design, Manufacture and Testing of Cold Run Drying Engineering Sample for Application in Simulator of Three Degrees of Dynamic Freedom of Satellite Status, *Journal of Sharif Mechanical Engineering*, no. 2, 2015 (In Persian فارسی).
- [5] A. M. Tahsini, S. T. Mousavi, Unsteadiness Effects on Variable Thrust Nozzle Performance, World Academy of Science, Engineering and Technology, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic & Manufacturing Engineering*, vol. 7, no. 12, 2013.
- [6] R. Deng, T. Setoguchi, H. D. Kim, A Computational Study on the Thrust Performance of a Supersonic Pintle Nozzle, *international symposium on turbulence and shear flow phenomena, Melbourne, Australia*, June 30 - July 3, 2015.
- [7] A. E. Makled, H. Belal, Modeling of Hydrazine Decomposition for Monopropellant Thrusters,

- 13th International Conference On Aerospace Sciences & Aviation Technology, Asat-13-Pp-22, May 26 – 28, 2009.
- [8] J. Wu, G. Cai, B. He, H. Zhou, Experimental and Numerical Investigations of Vacuum Plume Interaction for Dual Hydrogen/Oxygen Thrusters, School of Astronautics, Beihang University, *Vacuum Journal*, vol. 128, June 2016, pp. 166–177.
- [9] I. D. Boyd, Numerical Modeling of Spacecraft Electric Propulsion Thrusters, *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 41, Issue 8, November 2005, pp. 669–687.
- [10] M. H. Shafaei, F. Ghadak, Direct Design of Axial Symmetry Duct Based On Euler Equations, 9th Iranian Aerospace Society Conference, Islamic Azad University, Science and Research Branch, February 8-9, 2010 (In Persian فارسی).
- [11] S. Ghadak, F. Ghadak, Investigation of Axial Symmetry Nozzle Design Methods of a Wind Tunnel and Analysis of Its Performance with Fluent Software, *Bachelor's Degree Thesis, Imam Hossein University, Faculty of Engineering, Department of Mechanics and Aerospace*, September, 2008 (In Persian فارسی).
- [12] M. A. Jozvaziri, M. Hamzehpour, F. Ghadak, Feasibility and Calibration of the Transonic Wind Tunnel with Mouskegaard-Beybetic Model of Numerical Method and Comparison with Experimental Results, *the 1th National Conference On the Necessity of Air-Launched Weapons in Future Battles, Imam Hossein University*, Fall, 2013 (In Persian فارسی).
- [13] Gambit 2.4.4 User Guide, Fluent Inc.
- [14] Fluent 6.3 User Guide, Fluent Inc.

پی نوشت

-
1. thruster
 2. pintle valve
 3. jet vane
 4. actuator
 5. hydrazine
 6. CFD
 7. super sonic
 8. inverse design
 9. sub sonic
 10. journal file
 11. Gambit
 12. Fluent
 13. SIMPLE
 14. pressure base
 15. density base
 16. AUSM
 17. spalart allmaras