ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir

طراحی سیستم کنترل بردار تراست بهوسیله پاشش مایع داخل نازل و شبیهسازی عددی جریان وابسته

 $^{2^{*}}$ محمدرضا نجاری 1 ، محمدرضا حیدری

1 - دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، تهران
 2 - دانشیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، تهران
 *تهران، صندوق پستی heidarimr@piau.ac.ir3761396361

چکیدہ	اطلاعات مقاله
کنترل بردار تراست یکی از روش های کنترل موقعیت موشک هایی است که به کمک تراست ناشی از خروج گاز حرکت میکنند. همه روش های کنترل بردار تراست مستقل از نیروهای آیرودینامیکی اتمسفر هستند و تا زمانی که موتور دارای تراست باشد کارایی خود را حفظ میکنند. سیستمهای باشش ثانویه یکی از حوار روش عمده کنترل بردار تراست میباشد. این پژوهش ایتدا به شناسایی اجزاء و طراحی مقومی کا	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 24 آبان 1394 پذیرش: 11 دی 1394 بندیرش: 11 دی 1394
سیستهای پیش نوب یا یکی تر پهر تروین علیا علین بردار تراست بی بیش مایع درون نازل می پرداید. سپس به نحوه جانمایی اجزاء بر	ارائه در سایت: 15 اسفند 1394
سیستم و طراحی اولیه منیفولد یک نوع سامانه کنترل بردار تراست به روش پاشش مایع درون نازل می پردازد. سپس به نحوه جانمایی اجزاء بر	<i>کلید واژگان:</i>
روی نازل و همچنین طراحی دقیق تر برخی از اجزاء همچون انژکتور و مخازن این سیستم پرداخته می شود. در ادامه به شبیه سازی عددی جریان	طراحی سیستم
و نیز طراحی و بررسی پاسدهها در سیستم عسرل بردار براست به روس پاسس مایع درون نارل، پرداخته سداست. همچنین طراحی و	عصر بردار نراست
شبیهسازی عددی در دو بخش سیستم پاشش و اثرات پاشش انژکتورها به داخل جریان اصلی مورد تحلیل قرارگرفته و نتایج آن ارائه و	پاشش مایع
اعتبارسنجی گردیده است. از دستاورد این تحقیق میتوان بهعنوان الگویی برای طراحی و تحلیل انواع سامانههای کنترل بردار تراست به روش	شبیهسازی عددی جریان
پاشش سیال جانبی، بر روی انواع موشکها با نازلهای متفاوت، استفاده نمود.	منیفولد

System design thrust vector control via liquid injection within the nozzle and the numerical simulation of the corresponding flow

Mohammad-Reza Najjari, Mohammad-Reza Heidari^{*}

Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Parand Branch, Tehran, Iran *P.O.B 3761396361 Parand, Tehran, Iran, heidarimr@piau.ac.ir

ARTICLE INFORMATION ABSTRACT

Original Research Paper Received 15 November 2015 Accepted 04 January 2016 Available Online 05 March 2016

Keywords: system designing thrust vector control liquid injection numerical simulation of flow manifold One way to control the position of a missile is to control thrust vector which moves with help of thrust due to exiting gas. All thrust vector control (TVC) methods are independent of aerodynamic forces of atmosphere and until the engine has thrust, maintain their performance. Secondary injection systems are one of the four major TVC methods. In this study, first the components are identified and conceptual design of system is drawn and the preliminary design of manifold of a type of thrust vector control system using a liquid injection thrust vector control (LITVC) isdetermined. Then the layouts of components on some parts such as injectors and reservoirs, as well as detailed design of the system are discussed. The numerical simulation of flow and the design and study of the sprayers in LITVC systems will be discussed. Also, numerical designing and simulation in two parts: injection system and the results of this study can be used as a model for the design and analysis of various kinds of TVC systems with lateral fluid method on a variety of missiles with different launchers.

موشکهای تاکتیکی برای تغییر سریع زاویه بردار تراست جهت هدفگیری در ارتفاع پایین در همان لحظات اولیه بعد از شلیک دانست. به علت سرعتپایین موشک در لحظات اولیه شلیک، روشهای دیگر قابلیت این تغییر زاویه را ندارند. از دیگر مزایای این روش میتوان به عملگرهای ساده و کوچک، باقابلیت عملکرد طولانیمدت، سادگی کنترل و عدم حساسیت نسبت به معایب وسایل مکانیکی مرتبط با این سیستمها، مانند فرسایش، ذوب، انحراف و تغییرشکل دمایی اشاره نمود. اساس کار سیستم پاشش ثانویه،

این پژوهش به بررسی و طراحی سیستم کنترل بردار تراست به روش پاشش ثانویه از نوع مایع¹ میدردازد. برای طراحی سیستم و اطمینان از صحت طراحی انجام شده، از روش حل عددی جریان استفادهشده است. یکی از مزایای برتری روش کنترل بردار تراست بهوسیله پاشش مایع نسبت به دیگر روشهای کنترل بردار تراست² را میتوان قابلیت استفاده از این سامانه در

LITVC ² TVC

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

M.-R. Najjari, M.-R. Heidari, System design thrust vector control via liquid injection within the nozzle and the numerical simulation of the corresponding flow, *Modares* Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 251-262, 2016 (in Persian)



Please cite this article using:

تغییر در میدان جریان یک نازل از طریق پاشش سیال ثانویه درون بخش واگرای نازل و درنتیجه تغییر بردار تراست میباشد.

روش کنترل بردار تراست بهوسیله پاشش سیال جانبی، به کنترل جهت بردار تراست گازهای خروجی از نازل می پردازد. این نازل ممکن است بر روی یک موشک، فضاپیما، هواپیما، ماهوارهبر و یا حتی اژدر نصب شده باشد. این روش برای وسایلی که در جو رقیق یا ماورا جو پرواز می کنند و فاقد کار آیی یا اثر نیروهای آیرودینامیکی هستند، استفاده فراوان دارد. برای کنترل راکتهای ماهوارهبر یا فضاپیما و همچنین خود ماهوارهها که در خارج جو نمی توانند از نیروهای آیرودینامیک استفاده کنند، TVC تنها راه قابل تصور است.

علاوه بر این همانطور که اشاره شد در ابتدای دوره پرتاب موشکها، مخصوصا موشکهای سنگین، به دلیل پایین بودن سرعت حرکت، نیروهای آیرودینامیکی ناچیز هستند. لذا، یکی از راههای جلوگیری از انحراف موشکها در این لحظات استفاده از روش TVC می باشد.

روش موسوم به پاشش ثانویه از دهه 50 میلادی برای کنترل بردار تراست موتورهای سوخت جامد، مورداستفاده قرار گرفته است. در این روش بردار تراست بهوسیله تزریق سیال از سوراخهایی در دیواره نازل، کنترل می شود. به طوری که تزریق سیال از سوراخها، سبب تغییر لایه مرزی نازل شده و همین امر جهت جریان گاز خروجی از نازل و توزیع فشار روی جدارهی داخلی نازل را تغییر داده و درنتیجه جهت بردار تراست را تغییر میدهد. گرین و همکارانش در سال 1963 آزمایشهایی پیرامون پاشش مایع درون نازل (در موقعیتهای مختلف پاشش) انجام داده و میزان انحراف بردار نیروی تراست را به دست آوردند [1]. گزارش سال 1974 ناسا² تحت عنوان کنترل $^{4}\mathrm{III}$ بردار تراست موشک سوخت جامد $^{\mathrm{s}}$ به ارائه طرحی برای موشک تیتان پرداختهاست [2]. مارتین و پاور در سال 1981 به ارائه طرحی برای سیستم LITVC شاتل اسآربی⁵ پرداختند [3]. تیسوهاز و همکارانش در سال 2007 زیرسیستمهای مربوط به یک موتور هیبریدی کوچک از قبیل سیستم پیشرانش، سیستم تغذیه سوخت، و تجهیزات زمینی سیستم کنترل بردار تراست با پاشش مايع را آزمايش نمودند [4]. سوبانش و همكارانش در سال 2013 اقدام به شبیهسازی عددی جریان نازل نمودند. از نتایج حاصل از این تحقيق ميتوان به پيدا كردن موقعيتي بهينه براي پاشش جريان فرعي اشاره نمود که موقعیت 20درصد از طول کل نازل را موقعیتی مناسب برای پاشش جریان فرعی معرفی می کند. آنها همچنین پاشش انژکتور جانبی با سرعت مافوق صوت را مناسبتر از یاشش انژکتور با سرعت نزدیک صوت دانستهاند .[5]

در داخل کشور نیز حیدری و همکارانش طی سالهای 2008 تا 2016 درزمینهی تحقیق و بهینهسازی سیستم LITVC به نتایج مهمی دست یافتند. آنها در گام اول تحقیقات به بررسی روشهای مختلف TVC و مزایا و معایب روش کنترل بردار تراست با پاشش سیال جانبی پرداخته و سپس فيزيك جريان درون نازل و الكوريتم طراحي سيستم LITVC را مورد مطالعه قرار دادند [6-6]. ایشان در سال 2008 ابتدا روش های عمومی کنترل بردار تراست را مطالعه و دستهبندی نموده و ضمن مقایسه پارامترهای مختلف، جایگاه روش LITVC بین سایر روشها را معرفی و معایب و مزایای همه

روشها را با یکدیگر مقایسه نمودند [6]. سپس کاربرد روش LITVC در کلاسهای مختلف موشکها را بصورت آماری بررسی کرده و جداولی از مشخصات موشکهای مختلف که از این زیرسیستم استفاده کردهاند را ارائه نمودند [7]. آنها در سال 2009 با شبیه سازی جریان و نمایش متغیرهای وابسته مانند توزيعات فشار، دما، چگالی و عدد ماخ روی دیواره داخلی نازل، فیزیک تداخل جت جانبی (جریان ثانویه) با جریان اصلی درون نازل را مورد مطالعه قرار دادند [8]. تحقیقات آنان به شناسایی فیزیک جریان و یدیدههای دینامیک گازی حاصل از اندرکنش بین دو جریان، مانند تشکیل شوک بیضی گون جلو نقطه پاشش، کمک شایانی کرد. در ادامه در سال 2010 پس از آشنایی با همه پارامترهای آیرودینامیکی مؤثر در سیستم LITVC مانند جنس سیال، نوع پاشش، زاویه پاشش، نسبت دبی پاشش (به دبی جریان اصلی) و موقعیت پاشش، یک الگوریتم برای فرآیند طراحی آیرودینامیکی سيستم LITVC تدوين نمودند [9].

حیدری و همکاران در گام دوم تحقیقاتی خود به شبیهسازی عددی پاشش جریان مایع درون گازهای خروجی از محفظه احتراق پرداخته و اثرات نوع سیال پاشش و سپس طراحی یک نوع سامانه LITVC را مورد مطالعه قرار دادند [10-13]. آنها در سال 2012 به بررسی اثر پاشش تکانژکتوره فرئون بر بردار تراست موشک پرداخته و اثبات نمودند که مقدار بهینه دبی پاشش به شدت وابسته به موقعیت نقطه پاشش میباشد [10]. در ادامه در سال 2015 با مطالعه پاشش چندانژکتوره، تعداد و نحوه ی چیدمان انژکتورها و توزیع دبی کل پاشش بین انژکتورها را بررسی نموده و دریافتند که علاوه بر مشخصات هر پاشنده، میزان دبی کل پاشش و نحوهی توزیع آن بین پاشندهها بر زاویه و میزان انحراف بردار تراست (نسبت نیروی جانبی به نيروي محوري) تأثير بسزايي دارد [11]. آنها در سال 2015 در پژوهش طراحی سیستم و منیفولد یک نوع سامانه LITVC به ارائه طرحی مفهومی از یک نوع سیستم کنترل بردار تراست به همراه طراحی مخازن و آکومولاتور و انژکتورهای این سیستم پرداخته و با استفاده از نتایج حاصل از خروجی انژکتور، تأثیر پاشش سهانژکتوری جریان فرعی بر روی جریان اصلی نازل را مورد مطالعه قرار دادند [12]. بالاخره در سال 2016 با مطالعه جنس سيال تزريقي، اثر انواع سيالات مانند هوا، آب، تترا اكسيد نيتروژن⁶و فرئون⁷را با یکدیگر مقایسه نمودند. در تحقیق مذکور با انتخاب نقطه 35 تا 40 درصد طول نازل واگرا به عنوان موقعیت بهینه پاشش، نشان داده شد که مایع فرئون 12 یکی از مطلوبترین سیالها برای استفاده در سیستم LITVC میباشد .[13]

2- طراحی مجموعه کنترل بردار تراست بروش پاشش مایع درون نازل

سیستم کنترل بردار تراست به روش پاشش مایع در این تحقیق دارای اجزایی مانند مخزن گاز فشار بالا، شیر اطمینان (فقط برای مخازن فشار بالا که وظيفه كنترل ميزان پاشش را بر عهدهدارند)، رگلاتور فشار يا شير اطمينان⁸، تيغه درون تانک⁹، تانک چند بره يا آکومولاتور¹⁰، لولهها، شيرهيدروليکی، دبی سنج¹¹، منیفولد¹², مرکز فرمان¹³ و انژکتور¹⁴ می باشد. در این سیستم منبع

SITVC (Secondary Injection Thrust Vector Control)

NASA

Solid Rocket Titan III

⁵ Shuttle SRB

⁶ N₂O₄ CCl₂F₂

⁸ Pressure Regulator (Pressure Valve)

Blade

Accumulator ¹¹ Flow Meter

¹² Manifold

TVC Electrical Distribution Box (ECU)

¹⁴ Injector

گاز پرفشار نیتروژن وظیفه تأمین فشار ثابت سیال پاشش را برعهده دارد. این فشار بر روی تیغه درون آکومولاتور وارد گردیده، و این تیغه لاستیکی فشار را در طرف دیگر به سیال پاشش وارد میسازد. برای کاهش فشار گاز مخزن نیتروژن و رسیدن به فشار مد نظر در مخزن فرئون، از یک رگلاتور تنظیم فشار استفاده شدهاست. دبی سیال با فشاری مشخص، توسط شیر هیدرولیک و انژکتور تعبیه شده قابل کنترل میباشند. شیر هیدرولیکی دبی سیال انژکتور را بهوسیله کنترل موقعیت سوزن انژکتور کنترل مینماید. جعبهفرمان سیستم با توجه به مأموریت موشک برای تغییر مسیر خود، دستورات لازم را به شیر مجموعه ارسال کرده تا شیر از طریق تعیین موقعیت مناسب سوزن انژکتور، پاشش را انجام دهد. در طراحی این مجموعه از چهار انژکتور برای کنترل بردار تراست (که با زاویه 90 درجه نسبت به یکدیگر بر روی محیط نازل قرار گرفتهاند) استفاده شده است.

1-2- ورودىھاى طراحى

در این تحقیق پارامترهای ورودی طراحی متناسب با کاربرد سیستم کنترل بردار تراست برای یک راکت نمونه برگزیده شدهاند. از جمله این ورودیها میتوان به وزن بدنه مجموعه مخازن اشاره کرد که نباید بیشتر از 15 کیلوگرم باشد. همچنین طراحی و جانمایی کلیه اجزای سیستم همانطور که در شکل 1 مشاهده میشود، در محل درنظر گرفته شده پیرامون نازل انجام پذیرد. بعلاوه این سیستم به گونهای طراحی میشود که مجموع زمان کارکرد سیستم در دبیهای مختلف حداقل 3 ثانیه باشد و نیز میزان انحراف بردار تراست بااستفاده از بیشترین دبی پاشش انژکتور حداقل به 1.2 درجه برسد.

2-2- مشخصات اوليه سيستم

پیکرهبندی اجزای سیستم کنترل بردار تراست به روش مایع درون نازل، در فضای اطراف نازل صورت می پذیرد. مشخصات هندسی نازل و همچنین موقعیت استقرار انژکتورها در شکل 1 و در شکلهای ادامه نشان دادهشده است. این انژکتورها طبق مطالعات انجامشده در مرجع [13] در موقعیت 40 درصد طول نازل واگرا، قرار دادهشدهاند که موقعیتی بهینه برای عملکرد انژکتورها میباشد. شعاع نازل در مقطع پاشش برابر 149.8 میلیمتر میباشد. مشخصات جریان در مقطع نزدیک پاشش با استفاده از روایط آیزنتروپیک محاسبه شده و در جدول 1 ارائه شده است. این مشخصات با نتایج شبیه سازی عددی مقایسه گردید و صحت محاسبات تأیید شد. یکی از پارامترها مهم در طراحی، مشخص بودن فشار جریان اصلی در محل انژکتور پاشش میباشد. در موقعیت نزدیک به محل پاشش، یک موج ضربهای کمانی تولید می شود و لذا این فرضیه قابل طرح است که شاید بتوان از روابط موج ضربه ای قائم برای محاسبه این فشار در نوک موج کمانی استفاده کرد. از طرف دیگر دلیل عدم استفاده از روابط موج ضربهای قائم برای تعیین شرایط جریان نازل در موقعیت پاشش آن است که این روابط توانایی درنظر گرفتن اثر سیال پاشش و همچنین مقدار و شرایط فیزیکی دیگر آن را بر روی جریان اصلی نازل ندارند و لذا استفاده از شبیهسازی عددی در موقعیت پاشش، برای بهدست آوردن شرایط جریان ضروری می باشد. در بخش شبیه سازی عددی درباره تغییرات فشار در نازل به صورت کامل بحث می شود. شبیه سازی عددی صورت گرفته برای بهدست آوردن فشار محل پاشش در مقطع پاشش، با فرضياتي چون شعاع پاشش 0.00698 متر و سيال پاشش فرئون12 و دبي پاشش حدود 6.8 كيلوگرم صورت پذيرفته است. ميزان فشار بهدستآمده در مرز خروجي انژكتور، 12 بار ميباشد. از اين فشار براي طراحي سيستم كنترل

بردار تراست به روش مایع درون نازل در نقطه خروجی انژکتور استفاده میشود.

3-2- طراحی سیستمی اجزا

برای طراحی سیستم LITVC اجزا به صورتی بر روی نازل جانمایی شدهاست که تقریبا تعادل در آنها رعایت شده و همه اجزا از لحاظ ابعادی با یکدیگر همخوانی مناسب داشته باشند. برای طراحی کلی اجزای سیستم و نحوه جانمایی و قرارگیری این اجزا بر روی نازل، به بررسی و مقایسه چندین طرح و جانماییهای مختلف پرداخته شده است و درپایان به طرح نهایی سیستم، که در شکل 2 مشاهده می شود، رسیده است. در طرحهای پیشین منابع گاز پرفشار و مخزن آکومولاتور بهصورت استوانهای شکل طراحی شده بود و نمی توانست مقدار موردنیاز از سیال را با خود حمل نماید. استفاده از رگولاتور در یکطرف مخزن و عدم تعادل مجموعه و همچنین ورود گاز پرفشار به صورت نامتقارن به درون مخزن آکومولاتور از دیگر نقصهای طراحیهای اولیه بوده است. اما در طراحی نهایی سیستم این تحقیق، دو منبع آکومولاتور و نیتروژن با رعایت تعادل مجموعه، به صورت مناسب چنبرهای، حول گلوگاه نازل قرار گرفتهاند. همچنین در طراحی این دو منبع نکتهای که حائز اهمیت است این است که باید حجم مخزن نیتروژن بگونهای باشد که بتواند علاوه بر حفظ فشار، تمامی حجم مخزن آکومولاتور را اشغال نماید و اگر اینگونه نباشد میزان سیالی که در داخل منبع آکومولاتور میماند عملا غیرکاربردی بوده و موجب افزایش وزن موشک میشود. سیستم حاضر قابلیت حمل 24.22 كيلوگرم از سيال فرئون 12 را در مخزن أكومولاتور و حمل 0.76 کیاوگرم نیتروژن را در مخزن فشار بالا دارا میباشد. دو رگلاتور در نظر گرفتهشده در بین دو مخزن بهصورت متقارن با زاویه 180 درجه نسبت به یکدیگر نصب شده اند، بطوریکه جریان نیتروژن علاوه بر تقارن میتواند فشار یکنواختی را به تیغه آکومولاتور وارد سازد. میزان فشار در نظر گرفتهشده برای رگولاتور با توجه به میزان پاشش جریان فرعی که %5 دبی جریان اصلی مىباشد برابر 42.2 بار است. چهار شير و انژكتور طراحى شده با زاويه 90 درجه نسبت به یکدیگر بر روی نازل نصب شدهاند. جعبه فرمان در این سیستم با تحلیل شرایط مأموریت موشک و دستوردادن الکتریکی به شیر و انژکتورهای سیستم، موشک را در موقعیت بهینه قرار میدهد. نحوه قرارگیری اجزای سیستم پیرامون نازل در شکل 2 قابل مشاهده است.



شکل 1 محل مجاز جانمایی طرح سامانه LITVC

جدول 1 محاسبات مربوط به جریان نازل در موقعیت نزدیک به پاشش جریان فرعی Table 1 The nozzle flow properties in close situation to secondary flow injection

دما K	چگالی kg/m ³	فشار Bar	عدد ماخ	A/A*
1386	0.94	3.75	2.76	3.89

با توجه نحوه جانمایی اجزا بر روی نازل و همچنین سایر شرایط موجود، مخزن نیتروژن فشار بالا دارای قطر داخلی 111 میلیمتر میباشد. لولههای اتصال بین اجزا به صورتی در نظر گرفته شده اند که ابعاد این اتصالات در بازار موجود بوده و همچنین از پیچیدگی طراحی سیستم کاسته شده است. لوله اتصال بین مخزن نیتروژن و رگولاتور دارای شعاع 12.7 میلیمتر میباشد. قطر داخلی مخزن آکومولاتور نیز برابر 134 میلیمتر است که توانایی حمل میزان سیال بیشتری نسبت به طراحیهای پیشین خود را داراست.

در شکل 3 میتوان نحوه قرارگیری دو مخزن نیتروژن و فرئون را مشاهده نمود. مشخصات کامل هندسی نازل نیز در ادامه خواهد آمد.لولههای اتصال مخزن آکومولاتور به سمت شیرها و انژکتورهای سیستم دارای شعاع داخلی 6.5 میلیمتر میباشد که با کمترین میزان طول و انحنا در طراحی مسیر لوله، توانایی انتقال سیال را با کمترین میزان افت فشار داراست.

طراحی مخازن با استفاده از ورق فولاد ضدزنگ AISI 4130 با استحکام کششی 435 مگاپاسکال، که دارای کاربرد در مخازن فشار بالاست، انجام پذیرفته است. شبیهسازی صورت گرفته برای بدست آوردن میزان ضخامت مخزن نیتروژن، با فشار داخلی 50 بار مطابق شکل 4 دارای ضخامت 1.5 میلی متر و وزن 5.8 کیلو گرم میباشد. میزان ضخامت محاسبهشده برای مخزن فرئون مطابق با شکل 5، با فشار داخلی 42.2 بار، برابر 1.7 میلی متر و وزن مخزن 6.7 کیلو گرم شده است.

طرحهای اولیه سیستم کنترل بردار تراست بهوسیله پاشش مایع در این پژوهش، همانطور که در شکل 6 مشاهده میشود دارای برخی معایب طراحی بودند که از جمله آنها میتوان به عدم رعایت تعادل در مجموعه در استفاده از یک مخزن نیتروژن و رگولاتور آن در یک طرف نازل اشاره کرد. همچنین از آکومولاتورهای سیلندری کوچک استفاده نموده که توانایی حمل فرئون بسیار کمی را با خود داشته و نمیتواند شروط ورودی سیستم (با پاشش حداقل 3 ثانیه) را ارضا نماید. طرح دیگر که با استفاده از مخازن استوانهای طراحی شده و تعادل مناسبی نیز نسبت به طرح پیشین خود دارد، توانایی حمل میزان اندکی از فرئون را دارا میباشد و لذا مناسب مجموعه نیست. بالأخره بعد از چند طرح اولیه، یک طرح نهایی که در شکل 2 مشاهده شد، بدست آمد که از لحاظ تعادل و جایابی بر روی نازل مناسب بوده و میزان حمل

4-2- طراحی انژکتور

طراحی سیستم LITVC نیازمند شیر و انژکتوری است که توانایی کارایی در



شکل 2 محل قرارگیری اُجزای سیستم LITVC



Fig. 3 The location of nitrogen and accumulator tanks on the nozzle شکل 3 محل قرار گیری مخازن نیتروژن و آکومولاتور بر روی نازل



Fig. 4 Structural analysis of the nitrogen tank شكل 4 شبيهسازى عددى سازهاى مخزن نيتروژن

این نوع سیستم را دارا باشد. ازجمله این کاراییها، توانایی عملکرد سریع در حدود 20 میلی ثانیه در فشارهای بالا می باشد. فشار انژکتور طبق مطالعات انجامشده باید در محدوده 30 تا 100 بار بوده و توانایی پاشش دبیهای بالا را برخوردار باشد [3]. در این پژوهش اقدام به طراحی انژکتوری شده است که طرح اولیه آن براساس الگوی انژکتور استفادهشده در موشک تیتانIII (معرفی شده در کتاب ناسا تحت عنوان معیارهای طراحی فضایی) میباشد. در این طراحی باوجود نداشتن ابعاد دقیق انژکتور سعی بر طراحی متناسب با الگوی موجود شده است. نسبت ابعادی اجزای تشکیل دهنده این انژکتور با انژکتور مذکور تطابق نسبی دارد. این مجموعه که بهنام شیر انژکتور الكترومكانيكي معرفي ميشود شامل يك شير هيدروليكي است كه وظيفه آن تنظیم موقعیت سوزن انژکتور بهوسیله فشار روغن و همچنین کنترل دبی جریان ورودی به انژکتور است. شکل 7 نمای برش خورده طولی از انژکتور حاضر را در حالت کاملا باز نشان میدهد. انژکتور طراحی شده دارای سه مجرای خروجی به شعاع 4 میلیمتر در هرکدام از خروجیها میباشد. محاسبه عدد بهدستآمده برای شعاع خروجی انژکتور بر اساس مطالعات صورت گرفته در شبیه سازی جریان برای نازلی مشابه بوده است [11]. البته طرح ارائه شده در این مقاله طرح نهایی است. در طرحهای اولیه انژکتور، میزان شعاع خروجی انژکتور بهگونهای طراحیشده بود که برای تأمین دبی موردنظر پاشش جریان فرعی، باید فشار منبع نیتروژن در فشاری خارج از فشار مجاز در نظر گرفته شده برای سیستم قرار می گرفت. این مسئله باعث بروز خطا در طراحی سیستم می گردید.

در طرح نهایی انژکتور ارائهشده توجه ویژهای به ورودی جریان نیز شده است بهگونهای که پس از چندین طراحی با شعاعهای مختلف و زاویههای

مختلف برای کانال جریان ورودی به داخل انژکتور و نیز شبیهسازی این جریان، ابعادی یدست آمده است که جریان سیال سیستم با کمترین اغتشاش در داخل انژکتور و با دبی تقریبا یکسان در سه مقطع خروجی انژکتور، در مسیرهای جریان ادامه یابد. ابعاد بهدستآمده برای ورودی انژکتور به این صورت است که سیال در مجرایی به شعاع 6.5 میلیمتر و زاویه 48 درجه وارد انژکتور میشود. با توجه به هندسه در نظر گرفتهشده برای طراحی انتهای سوزن انژکتور، بازهی حرکتی سوزن انژکتور در راستای محور سوزن انژکتور، بین حالت کاملا بسته و کاملا باز 5 میلیمتر شده است.

نتایج حاصل شده بیانگر این موضوع است که این انژکتور با سیال عبوری فرئون12، در حالت کاملا باز و با فشار کاری مخزن 42.2 بار، قابلیت عبور حدود 6.8 کیلوگرم بر ثانیه سیال را از خروجی خود خواهد داشت. فشار بهدست آمده برای منبع نیتروژن به صورتی حاصل گردیده است که یک انژکتور در حالت کاملا باز قرار داده شده است و سه انژکتور دیگر کاملا بسته می ماند. حال با این شرایط، فشار مخزن نیتروژن به صورتی تنظیم می گردد که دبی سیال خروجی از انژکتور به مقدار دلخواه خود برسد. حرکت سوزن انژکتور تقریبا تا فاصله 1.5 میلی متر از حرکت خود دارای رفتاری خطی نسبت به سطح مقطع عبور جریان می باشد و از آن به بعد دارای رفتاری انژکتور و سطح مقطع عبور جریان، در نمودار شکل 8 آورده شده است. این نمودار وضعیت این انژکتور را در طول جابجایی خود نشان می دهد و بر اساس آن می توان رفتار این سوزن را در موقعیت دلخواه به دست آورد.

F:Static Structural Equivalent(von-Mises) Stress Unit:Pa



Fig. 5 Structural analysis of the Freon tank شکل 5 شبیهسازی عددی سازهای مخزن فرئون



Fig. 6 The samples of initial designs of liquid injection thrust vector control system

شکل 6 نمونههایی از طراحیهای اولیه سیستم کنترل بردار تراست به وسیله پاشش مایع درون نازل

رابطه بین حرکت سوزن انژکتور ودبی عبوری از آن، بر اساس نتایج حاصل از طراحی انژکتور، در شکل 9 ارائه شده است. این نتایج در فشار ثابت مخزن 42.2 بار اندازهگیری شده است. همانطور که مشاهده میشود این انژکتور میتواند با جابجایی کمتر از 2.5 میلیمتر از حالت کاملا بسته، به دبی بالاتر از 5 کیلوگرم بر ثانیه برسد.

3- شبیه سازی جریان سیستم LITVC

در این پژوهش، شبیه سازی جریان سیستم در دو بخش کلی صورت می پذیرد. بخش اول شامل شبیه سازی جریان عبوری سیال از ابتدای ورودی آکومولاتور تا انتهای خروجی انژکتورها می باشد که با استفاده از این شبیه سازی، فشار مخزن فرئون تعیین می گردد و رفتار انژکتور مورد مطالعه قرار می گیرد. بخش دوم شبیه سازی شامل، بررسی برخورد جریان جت جانبی با جریان اصلی نازل است. با استفاده از این شبیه سازی می توان صحت عملکرد طراحی با توجه به ورودی های طراحی را بررسی نمود. از جمله نتایج به دست آمده در این بخش می توان به میزان تغییر بردار تراست با توجه به طراحی انجام شده اشاره نمود. سیال مورداستفاده برای جریان در بخش شبیه سازی اول، مایع فرئون 12 می باشد. خواص این ماده در جدول 2 آورده شده است. این ماده و اکنشی با گازهای درون نازل نخواهد داشت. از این رو در شبیه سازی های مورت گرفته و اکنش شیمیایی بین این مواد مدل نمی گردد.

1-3- شبيهسازى جريان در بخش اول

در بخش اول شبیه سازی، برای ساده سازی وحل دقیق تر میدان جریان، ورودی های آکومولا تور به عنوان مقطع ورود جریان سیال در نظر گرفته و از غشای درون آن صرف نظر می شود. این فرض ساده ساز را می توان به عنوان فرض صحیحی در حل جریان در نظر گرفت، زیرا که وظیفه غشای داخل آکومولا تور در این سیستم، تأمین فشار سیال به صورت ثابت، به وسیله فشار



Fig. 7 The longitudinal section of injector in fully open attitude شکل 7 مقطع طولی انژکتور در حالت کاملا باز



Fig. 8 The crossing sectional variations of flow vs. movement of the needle of injector

شکل 8 نمودار تغییرات سطح مقطع عبوری جریان نسبت به حرکت سوزن انژکتور

گاز نیتروژن میباشد. فشار ورودی به گونهای محاسبه شدهاست که دبی خروجی جریان انژکتور حداقل به 5% جریان اصلی نازل رسیده باشد. همچنین فشار در نظر گرفتهشده در انتهای انژکتور، فشار محاسبهشده جریان داخل نازل، در مقطع قرارگیری انژکتورها در داخل نازل میباشد. لذا شرایط مرزی در مقطع خروجی انژکتورها به صورت فشار خروجی فرض میشود که تداعی کننده قرارگیری انژکتور در محیط نازل میباشد. فشار خروجی تداعی کننده قرارگیری انژکتور در محیط نازل میباشد. فشار خروجی است. در شبکهبندی جریان بخش اول که مرز آن در شکل 10 مشاهده میشود به دلیل نوع طراحی، امکان استفاده از سلولهای باساختار در تمام میدان جریان وجود ندارد. تعداد سلولهای این شبکه 141762 و تعداد گرههای آن 141762 میباشد. در شبیه سازی جریان بخش اول، برای مدل سازی آشفتگی جریان، از مدل Ω-۸ استفاده شده است.

در شبیهسازی عددی جریان با نرمافزار فلوئنت برای این پژوهش پنج جزء در نظر گرفته شده است. این اجزا شامل چهار سوزن انژکتور و محل گذر جریان فرئون 12 به صورت یکپارچه از ابتدای ورودی آکومولاتور تا انتهای خروجی انژکتورها می باشد. در این شبیه سازی با فرض ثابت ماندن فشار ورودی و فشار خروجی، با تغییر در موقعیت سوزن انژکتورها اقدام به شبیه سازی جریان می شود. در شبیه سازی انجام شده، مطابق شکل 11، دو انژکتور مجاور همیشه در حالت کاملا بسته می باشد و دو انژکتور دیگر، پاشش سیال را انجام می دهند. نتایج حاصل از این شبیه سازی در بخش اول با قرضیاتی که در قسمت قبل به آن اشاره شد برای شش حالت مختلف از انژکتورها محاسبه شده و در جدول 3 ارائه گردیده است. در این شبیه سازی ها انژکتورها محاسبه شده و در جدول 3 ارائه گردیده است. در این شبیه سازی ها با محاسبات انجام شده و در بخش طراحی انژکتور، سوزن انژکتور در موقعیتی با محاسبات انجام شده در بخش طراحی انژکتور، سوزن انژکتور در موقعیتی به دست آمده در این شبیه سازی ها، به عنوان پارامترهای ورودی انژکتور، برای به دست آمده در این شبیه سازی ها، به عنوان پارامترهای ورودی انژکتور، برای

2-3- شبیهسازی جریان در بخش دوم

در قسمت دوم شبیهسازی، برخورد جریان جانبی انژکتور با جریان اصلی نازل



Fig. 9 The passing flow rate variations vs. movement of the needle of injector

جدول 2 خواص شیمیایی سیال پاشش (فرئون 12)

Table 2 Chemical properties of the fluid injection (Freon 12)				
ولی (k	جرم مولک g/kmol)	C _p (J/kg_K)	چگالی (kg/m³)	نام مايع
1	20.92	978.1	1518.9	فرئون12

مورد بررسی قرار میگیرد. برای پارامترهای ورودی انژکتور، از نتایج بهدستآمده در خروجی شبیهسازی بخش اول که در جدول 3 اشارهشده است، استفاده میشود. بدینصورت میتوان نتایج حاصل از طراحی سیستم LITVC را مورد بحث قرارداد. هندسه نازل استفادهشده در این شبیهسازی و موقعیت پاشش انژکتورها را در شکل 12 قابل مشاهده است.

به دلیل نزدیک بودن فاصله پاشش 3 خروجی انژکتور، سطح مقطع معادلی از این سه خروجی به میزان دایرهای به شعاع 6.92 میلیمتر در نظر گرفته شده است و پاشش سیال از داخل یک مجرا به شعاع ذکر شده انجام می پذیرد. این انژکتور سیال را در دایره ای به شعاع مشخص، با زاویه عمود بر محور اصلی نازل و دبی و سرعت مشخص به داخل جریان پاشش می نماید. شرایط مرزی حاکم بر مرزهای نازل این گونه است که در مرز ورودی قسمت همگرای نازل شرط مرزی فشار ورودی قرار داده می شود. مقدار فشار کلی یا فشار سکون (P_0) در این ناحیه برابر 100 اتمسفر و مقدار دمای کلی (T_0) مادون صوت (یا نزدیک به صوت) می باشد، مقدار فشار اولیه مافوق صوت در این ناحیه برای مرز ورودی برابر صفر در نظر گرفته شده است. در خروجی این ناحیه برای مرز ورودی برابر صفر در نظر گرفته شده است. در خروجی این ناحیه برای مرز ورودی برابر صفر در نظر گرفته شده است. در خروجی این ناحیه (P_0 و T_0)، برابر فشار و دمای می گردد. مقدار فشار و دما در این نازل شرط مرزی فشار خروجی اعمال می گردد. مقدار فشار و دما در این نازل شرط مرزی فشار و دمای محیط در نظر گرفته شده که به تر تیب 1

محل پاشش انژکتورها در محل 40 درصد (فاصله محل پاشش از گلوگاه نسبت به طول بخش واگرای نازل) در نظر گرفتهشده است که در برخی مراجع این عدد 20 تا 40 درصد درنظر گرفته شدهاست [5]، ولی به دلیل جامع بودن مراجع داخلی در بحث کنترل بردار تراست به روش پاشش مایع درون نازل از مراجعی چون [13,10] در این موضوع استفاده میشود. زاویه



Fig. 10 The first part simulation grid شكل 10 شبكهبندى استفادهشده در شبيهسازى بخش اول

جدول 3 نتایج حل عددی جریان درموقعیت مرز خروجی انژکتورهای سیستم LITVC منتخب

Table 3 The numerical	results in output borders of the selected I	LITVC
system injectors		

سرعت	دبی محاسبهشده	درصد دبی عبوری جریان
 (m/s)	(kg/s)	انتهای انژکتور
 30.32	6.82	100%
22.60	5.42	80%
18.99	4.33	65%
15.72	3.45	50%
11.38	2.46	35%
 6.42	1.35	20%

پاشش جریان جانبی، 90 درجه (عمود بر محور نازل)، نسبت دبی پاشش 5 درصد (نسبت دبی سیال پاشش به دبی جریان اصلی موتور)، و جریان در مجاور دیوارهها آدیاباتیک (بیدرو) فرض شده است. مایع استفادهشده در جریان فرعی، فروئون12 میباشد که خواص آن در جدول 2 آورده شد. سیال جریان اصلی استفادهشده درون نازل، هوا میباشد که خواص ترموفیزیکی آن در جدول 4 مشاهده میشود.

در شبکهبندی جریان بخش دوم که در شکل 12 مشاهده میشود از سلولهای با ساختار در تمام این میدان استفادهشده است. تعداد سلولهای این شبکه 71862 و تعداد گرههای آن 75579 میباشد. برای حل جریان در این شبیهسازی از مدل آشفتگی ع- K استفاده شدهاست.

هندسه نازل در نظر گرفتهشده برای شبیهسازی و همچنین محل پاشش جریان فرعی در شکل 12 مشاهده گردید. نتایج بهدستآمده از شبیهسازی بخش اول، همان طور که در جدول 3 اشاره گردید، مربوط به شش تحلیل جریان میباشد. این تحلیلها با ترکیبی از یکدیگر در چهار حالت موردبررسی قرار میگیرندکه این حالتها عبارتاند از:

الف: یک انژکتور در حالت %100 باز و سه انژکتور دیگر بسته است.

ب: دو انژکتور مجاور یکدیگر، در حالت 50% باز و دوانژکتور دیگر بسته است. ج: یک انژکتور در وضعیت %20 باز و انژکتور همسایه آن در وضعیت %80 باز و دو انژکتور دیگر بسته است.

د: یک انژکتور در وضعیت %35 باز و انژکتور همسایه آن در وضعیت %65 باز و دو انژکتور دیگر بسته است.

شكل 13 كانتور توزيع دما در مقطع خروجي نازل را براي چهار حالت



Fig. 11 The Freon flow stream lines in accumulators and injectors of the LITVC system



Fig. 12 The second part simulation grid

Table 4 The sin and setting

شکل 12 شبکهبندی استفادهشده در شبیهسازی بخش دوم

جدول 4 خصوصيات سيال هوا

able 4 The all properties		
واحد	مقدار	پارامتر
کیلوگرم بر مترمکعب	گاز کامل	چگالی
ژول بر کیلوگرم درجه کلوین	1006.43	ظرفيت حرارتي ويژه
وات بر متر درجه کلوین	0.0242	ضريب هدايت حرارتي
کیلوگرم بر متر ثانیه	0.0000178	لزجت
کیلوگرم بر کیلومول	28.966	جرم مولکولی

مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1395، دوره 16، شماره 3

اشارهشده نمایش میدهد. همانطور که مشاهده میشود اثرات پاشش انژکتورهای مجاور روی جریان حوالی آنها مشهود میباشد. دما درمقطع خروجی در بیشترین حالت خود که نزدیک به دیوارههای نازل میباشد برابر با 1813 درجه کلوین است، این دما نسبت به دمای ورودی نازل که 3000 درجه کلوین درنظر گرفته شده، دچار افتی معادل 64 درصدی گردیده است. دما در کمترین میزان خود در مقطع خروجی، در راستای موقعیتهای پاشش به مقدار 432 درجه کلوین میرسد.

درکانتورهای بهدستآمده در مقطع طولی، میتوان رفتار جریان را از قسمت ورودی نازل تا مقطع خروجی نازل مورد بررسی قرارداد. شکل 14 کانتورهای طولی سرعت در صفحات محل پاشش را که با یکدیگر زاویه 90 درجه میسازند، در چهار حالت فرضشده نشان میدهد. بیشترین سرعت ایجادشده در صفحات موردبررسی 2110 متر برثانیه میباشد. همانطور که ملاحظه میشود سرعت در نزدیک دیوارهها برابر صفر بوده و در نقاط پاشش نیز با بوجود آمدن پدیده شوک، سرعت جریان کاهش مییابد. در کانتورهای شکل 14، خصوصا کانتور الف میتوان بهخوبی تغییرات سرعت در مقاطع مختلف نازل را مشاهده نمود. همچنین رسیدن سرعت جریان نازل در مقطع گلوگاه بهسرعت صوت (ماخ یک) و افزایش سرعت جریان بعد از گلوگاه بهخوبی قابلمشاهده است.

در جدول 5 نتایج فشار خروجی و مؤلفه های سرعت در سه جهت در مقطع خروجی نازل ارائه شده است. همچنین مقادیر نیروی تر است محوری و نیروی تر است جانبی محاسبه شده و بر اساس آن میزان زاویه انحراف بر دار تر است بدست آمده است. مقدار تر است محوری از رابطه (1) محاسبه می شود و حاصل دو جمله است. جمله اول حاصل ضرب دبی جریان خروجی نازل و متوسط سرعت محوری جریان در مقطع خروجی است و جمله دوم حاصل ضرب متوسط اختلاف فشار خروجی با فشار محیط و سطح مقطع خروجی می باشد. همچنین تر است جانبی طبق رابطه (2) از حاصل ضرب دبی جریان خروجی نازل و متوسط برآیند سرعت جانبی در جهت عمود بر محور تقارن، در مقطع خروجی نازل بدست می آید. دبی جریان خروجی از مجموع می می شده همچنین تر است جانبی طبق رابطه (2) از حاصل ضرب دبی مود ی می می بازل و متوسط برآیند سرعت جانبی در جهت عمود بر محور محود عمود بر محور تقارن، در مقطع خروجی نازل بدست می آید. دبی جریان خروجی از مجموع می شود. وضعیت برآیند سرعت جانبی در صفحه خروجی نازل نیز وابسته به می شود. وزایه پاشنده های فعال است.

$$T_{\rm x} = \dot{m}_{\rm t} \times V_{\rm x} + \Delta P_{\rm exit} \times A_{\rm exit} \tag{1}$$

$$T_{\rm s} = \dot{m}_{\rm t} \star V_{\rm r} \quad \& \quad V_{\rm r} = \sqrt{V_{\rm Y}^2 + V_{\rm Z}^2} \tag{2}$$

3-3- تغییرات پارامترهای مهم میدان جریان روی دیواره نازل واگرا

برای مطالعه تغییرات پارامترهای میدان جریان بر روی دیواره نازل واگرا در پاشش سیال جانبی فرئون12، چهار مسیر مطابق شکل 15 برروی این دیواره نازل بررسی شده است. در زاویههای صفر تا 360 درجه با اختلاف 90 درجه نسبت به یکدیگر، از نقطه پاشش سیال جانبی قرارگرفتهاند. مسیرهای زاویه صفر درجه و 90 درجه همسطح انژکتور و مجاور بدنه میباشد. توزیع پارامترها درست در نزدیکی دیواره روی اولین شبکه میدان جریان بهدستآمده و سرعت روی دیواره برابر صفر میباشد. اما نتایج مسیرهای 180 و 270 درجه دقیقا منطبق بر دیواره نازل است.

شکل 16 نشاندهنده نمودار توزیع فشار بر روی دیواره نازل در حالت پاشش تک انژکتوره، برای انژکتور %100 باز میباشد. تغییرات فشار استاتیک روی دیواره نازل واگرا، به وضوح بیانگر موقعیت تشکیل شوک در نزدیکی



Fig. 13 The temperature distribution on output nozzle section for four case injections

شکل 13 توزیع دما بر روی مقطع خروجی نازل برای چهار حالت از قرارگیری سوزن انژکتور



شماره حالت	الف	ب	5	د
درصد دبی عبوری از دو انژکتور همسایه	100% and 0%	50% and 50%	20% and 80%	35% and 65%
دبی پاشندهها (kg/s)	6.82	3.45 3.45	1.35 5.42	2.46 4.33
سطح مقطع خروجی(m ²)		45	0.215	
دبی جریان اصلی نازل (kg/s)		92	134.9	
فشار خروجی(Pa)	-34129.453	-33964.48	-33825	-33558
سرعت در جهت X در مقطع خروجی(m/s)	1948	1961	1953	1952
سرعت در جهت Y در مقطع خروجی(m/s)	0.61	24.8	40.7	34.7
سرعت در جهت Z در مقطع خروجی(m/s)	49.04	29.5	12.9	21.7
تراست محورى	230396	232155	230544	230636
تراست جانبی	5984.8	4701.2	5198.3	4986.1
زاويه انحراف تراست	1.48	1.16	1.29	1.23

جدول 5 نتایج بهدستآمده در تحلیل شبیهسازی دوم

شکلهای 17 و 18 و 19 نشان دهنده نمودار توزیع فشار بر روی دیواره نازل در حالت پاشش جفت انژکتوره، برای سه حالت منتخب انژکتورها میباشد. این جفت انژکتور در حالت زاویه صفر و 90 درجه در کنار یکدیگر قرار گرفتهاند. همان طور که در شکل 17 ملاحظه می شود در نقطه یاشـش بـه علت شکل گیری پدیده شوک، فشار بالا رفته و این تغییر فشار به علت پاشش یکسان انژکتورها به یکمیزان تغییر کرده و همانند حالت پاشش تک انژکتوره بافاصله گرفتن از نقطه یاشش به حالت عادی خود باز می گردد و فشار در دو یال دیگر پاشش در یالهای 180 و 270 درجه، بدون تأثیر از پاشش جانبی و مشابه یکدیگر است. در شکلهای 18 و 19 به علت پاشش ناهمسان دو انژکتور میزان تغییر فشار یکسان نبوده و هرچقدر میزان دبی پاشش افزایش می یابد میزان فشار حاصل از شوک در نقطه پاشش بیشتر میشود. میـزان فشار در موقعیت بالادست نقطه پاشش تقریباً برابر 3 بار می باشد و میزان افزایش فشار بر روی پالهای پاشش تا حدود 10 بار میرسد. همانطور که ملاحظه میشود مجدداً پاشش انژکتور جانبی تأثیری بر روند کاهشی فشار در دیگر یالهای موردبررسی ندارد. شکل 20 نشاندهنده نمودار توزیع دما بر روی دیواره نازل، در چهار حالت منتخب میباشد. همان طور که در این شکل ملاحظه می شود دما تا رسیدن به نقطه پاشش در یال هایی که پاشش از آن ها صورت نمی پذیرد دارای مقادیر یکسان بوده و یالهای پاشش به دلیل اینکه 0.03 میلیمتر از دیواره فاصله دارند، نسبت به سایر یال ها دارای دمای کمتری میباشند. این نتیجه گویای آن است که تغییرات دما به سوی محور نازل بسیار شدید می باشد. با پاشش سیال جانبی از پال های صفر و 90 درجه، دماي روى آن يالها نسبتاً كاهش بيشتري يافته است.

این موضوع وابسته به دمای سیال پاشش است. همان طور که قبلاً اشاره شد یالهای موردبررسی از گلوگاه نازل تا مقطع خروجی نازل در نظر گرفته شده است و دمای نازل در گلوگاه نسب به دهانه ورودی نازل 100 درجه کلوین کاهش یافته است. در موقعیت پاشش، دما بر روی یالهاتقریباً برابر 2000 درجه کلوین می باشد که با دمای به دست آمده در جدول 1 در نقطه نزدیک پاشش اختلافی 500 درجهای دارد. دما بر روی یالهایی که پاشش بر روی آنها صورت می پذیرد در نقطه خروج از نازل، با توجه به میزان پاشش انژکتورها بین 300 الی 900 درجه کلوین است. در یالههایی که

آنها به 2500 درجه کلوین میرسد. در دو یالی که پاشش در آنها صورت نمی پذیرد دما با شیب یکسانی کاهش می یابد و در اثر پاشش در یالهای دیگر این کاهش دچار تغییر محسوسی نمی شود. کاهش محسوس دما در مقاطع نزدیک به خروجی نازل ناشی از اثر شرط مرزی خروجی است.

شکل 21 نشان دهنده نمودار توزیع چگالی بر روی دیواره نازل در چهار حالت منتخب می باشد. همان طور که در این شکل ملاحظه می شود چگالی تا



Fig. 17 The static pressure distribution on the divergent nozzle wall, while those two injectors 50% open

شکل 17 نمودار توزیع فشار استاتیک روی دیواره نازل واگرا در حالت دو انژکتور 50% باز



Fig. 18 The static pressure distribution on the divergent nozzle wall, while that one injector 65% and another one 35% open 35% و 35\% و 35\% e 3

رسیدن به نقطه پاشش در چهار یال منتخب دارای مقادیری یکسان است و با پاشش سیال جانبی از یالهای صفر و 90 درجه، در این یالها چگالی به شدت افزایش می یابد میزان چگالی در نقطه پاشش تقریباً برابر 1 کیلوگرم بر مترمکعب است که با مقدار چگالی به دست آمده در جدول 1 که مربوط به خواص جریان در نقطه پاشش میباشد، اختلاف اندکی داشته و تأییدی بر صحت تحلیل این تحقیق است. میزان افزایش چگالی در موقعیت پاشش انژکتور 100% بازتقریباً دو برابر افزایش چگالی در پاشش 50% باز می باشد. می توان نتیجه گرفت که میزان افزایش چگالی نسبت مستقیمی با میزان دبی پاشش جریان فرعی دارد. به تدریج بعد از نقطه پاشش، چگالی کاهشیافته و با دیگر پالهای نازل هم مقدار می شود. بالاترین افزایش چگالی مربوط به پاشش 100% می باشد که در حدود 72 کیلوگرم بر مترمکعب است. جریان اصلی عبوری از نازل بدون پاشش سیال جانبی، به طور جداگانه تحلیل گردید. بطور کلی نتایج بهدستآمده در شکلهای 16 تا 21و مقایسه با جریان نازل بدون یاشش ثانویه، نشانگر آن است که با توجه به انتخاب مناسب یارامترهای پاشش، جریان روی دیـوارهی روبـروی نقطـهٔ پاشـش متـأثر از جـت جـانبی نمی باشد. این ویژگی مادام که شرایط پاشش به مقدار بحرانی و زاویه انحراف بردار تراست کمتراز مقدار بیشینه است، برقرار میباشد و در پاشش بحرانی، جریان ثانویه روی دیوارهی مقابل و سپس تمام جریان نازل اثـری مخـرب می گذار د.

4- اعتبار سنجى تحليل

برای تایید نتایج بهدستآمده در این تحقیق از نتایج کار آزمایشگاهی آقای گرین و همکارش استفاده شدهاست [1]. مشخصات هندسی و شرایط مرزی نازل استفاده شده در جدول 6 آمده است. سیال پاشش در این نازل فرئون 12می باشد. خصوصیات گازهای حاصل از احتراق موجود نمی باشد، بنابراین اطلاعات سیال اصلی به صورت دقیق نیست. موقعیت پاشش در این مقایسه در 48.3 درصد از طول واگرای نازل واقع شده است. همچنین، جدول 7پارامترهای پاشش و تأثیر آن بر عملکرد نازل را نشان میده.د. پارامتر نسبت دبی پاشش به دبی کل و $F_{\rm s}/F_{
m m}$ نسبت نیروی جانبی به نیروی $W_{\rm s}/W_t$ تراست محوری می باشد. نتایج شبیه سازی در دونقطه با نتایج تجربی مقایسه شده و در دبی پاشش 0.18 و 0.32 کیلوگرم برثانیه موردبررسی قرار گرفته است. دبی جریان اصلی این نازل 9.28 کیلوگرم بر ثانیه میباشد و میزان اختلاف نتایج در شبیه سازی اول و دوم تقریبا 11% شده است.

در شکل 22 نتیجه شبیهسازی در دونقطه فوقالذکر ارائهشده و نمودار تجربی متناظر با آن مستخرج از چهار نقطه نتایج تجربی رسم گردیده است.



Fig. 19 The static pressure distribution on the divergent nozzle wall, while that one injector 20% and another one 80% open شکل 19 نمودار توزیع فشار استاتیک روی دیواره نازل واگرا در حالت انژکتور 20% و 80% باز





c: Injector in 20% and 80% open situation



d: Injector in 35% and 65% open situation

Fig. 20 The temperature distribution on the four edges of divergent nozzle wall in four cases selected

شکل 20 نمودار توزیع دما روی چهار یال دیواره نازل واگرا در چهار حالت منتخـب پاشش

در این شکل محور افقی بیانگر نسبت دبی پاشش به دبی کل میباشد و محور عمودی نشاندهنده نسبت نیروی جانبی به نیروی تراست اصلی است. نکته



a: Injector in 100% open situation



d: Injector in 35% and 65% open situation

Fig. 21 The density distribution on the four edges of divergent nozzle wall in four cases selected

شکل 21 نمودار توزیع چگالی روی چهار یال دیواره نازل واگرا در چهار حالت منتخب

قابل تأکید این است که به دلیل نبود دادههای دقیق ورودی مسئله، نتایج تا حدودی با هم اختلاف دارند. با این وجود مقدار خطا قابل قبول می باشد.

Table 6 Geometric and boundary conditions of experimental model (laboratory sample)

واحد	مقدار	پارامتر
کیلوگرم بر ثانیه	9.28	دبی جریان اصلی
درجه کلوین	2400	دمای ورودی جریان اصلی
اتمسفر	106	فشار استاتیک ورودی جریان اصلی
کيلوگرم بر ثانيه	0.18	دبی پاشش (1)
کيلوگرم بر ثانيه	0.32	دبی پاشش (2)
درجه کلوین	300	دمای پاشش
درجه	صفر (عمود بر محور نازل)	زاويه پاشش
متر	0.04	طول بخش همگرا
درجه	40	زاويه بخش همگرا
متر	0.18	طول بخش واگرا
درجه	14	زاويه بخش واگرا
مترمربع	0.007846	مساحت سطح ورودى
مترمربع	0.012655	مساحت سطح خروجي
-	10.6	نسبت سطح خروجی به گلوگاه

5- جمع بندی و نتیجه گیری

پارامترهای طراحی سیستم LITVC شامل مواردی همچون حجم موشـک و نازل مورداستفاده و شرایط موتور موشک میباشد و لـذا طراحـی حجـم ایـن سیستم کنترل بر این اساس انجام پذیرفته است. میزان حجم مخازن نیتروژن و آکومولاتور بر اساس میزان فضای موجود برای جانمایی مناسب و همچنین مأموریت موشک و تخمین میزان استفاده موشک از کنترل بردار تراست میباشد. در طراحی حاضر سعی بـر کمتـرین اسـتفاده از مجـاری ارتبـاطی گردیده است که علاوه بر کاهش وزن کلی مجموعه، از افت فشار سیال نیز جلوگیری شود. در طراحی اجـزا توجـه خاصـی بـه متقـارنسـازی مجموعـه گردیده، که علاوه بر تعادل کلی مجموعـه، عملکـرد بهتـر اجـزا را بـه دنبـال خواهد داشت. استفاده از دو رگولاتور به صورت متقارن موجب یکنواختی فشار ورودی به داخل آکومولاتور شده که درنتیجه فشار یکسان در تمامی محیط آکومولاتور را در پی خواهـد داشـت. در ایـن پـژوهش بـا ثابـت نگـهداشـتن يارامترهايي چون فشار مخزن كه برابر 42.2 بار مي باشد و دبي يكسان ورودی، اقدام به تحلیل جریان و برسی نتایج گردیده است. میزان دبی مورد بررسی برای طراحی اجزا سیستم 5% دبی جریان اصلی میباشد که توانایی یاشش 6.8 کیلوگرم بر ثانیه از یک انژکتور در حالت کاملاً باز را خواهد داشت. میزان قطر داخلی مخازن نیتروژن و آکومولاتور به ترتیب 111 و 134 میلم،متر در نظر گرفته شده است. طراحی مخازن با استفاده از ورق فولاد ضدزنگ تمام استیل با تنش کششی 435 مگاپاسکال، و ضخامت مخازن نیتروژن و فرئون بهترتیب 1.5 و 1.7 میلیمتر در نظر گرفتهشده که با ضریب اطمینان 2 توانایی تحمل فشارهای داخلی مخازن را دارند. وزن دو مخزن با یکـدیگر برابـر 12.5 کیلـوگرم اسـت کـه از میـزان در نظـر گرفتـهشـده در ورودیهای سیستم کمتر میباشد.

میزان ابعاد مجاری ارتباطی بین اجزا به صورتی در نظر گرفته شده که از

نازل تفاوت دارد. در دیگر یالها که پاشش درآنها صورت نمی پذیرد، دما با روندی یکسان، تا موقعیتی نزدیک به انتهای نازل کاهش می یابد و در انتها به علت شرایط مرزی دچار کاهش شدید شده است. از نتایج به دست آمده در این پژوهش می توان برای رسیدن به مدل بهینه سیستم کنترل بردار تراست به روش پاشش مایع درون نازل استفاده کرد. همچنین این تحقیق الگوی مناسبی برای طراحی این نوع سیستم بر اساس پارامترهای اصلی جریان برای سایر موشکها خواهد بود.

6- مراجع

- C. J. Green, F. McCullough, Liquid Injection Thrust Vector Control, *AIAA Journal*, Vol. 1, No. 3, pp. 573-578, 1963.
 W. Howard. Duglass, NASA Space Vehicle Design Criteria, *Solid Rocket*
- W. Howard. Duglass, NASA Space Vehicle Design Criteria, *Solid Rocket Thrust Vector Control*, pp.70-103, December 1974.
 C. L. Martin, L. B. Powers, *Feasibility Study of LITVC for Shuttle SRB*, NASA Space Vehicle Science Science
- [4] J. Tsohas, L. J. Droppers, E. Glean, E. M. Dambash, S. D. Heister, Progress
- [4] J. Isonas, E. J. Dioppers, E. Gicai, E. M. Danhash, J. D. Teiser, Hogess in Technology Demonstration for a Small Hybrid Launch Vehicle, *Proceedings of 5th Responsive Space Conference*, April 2007.
- [5] Sh. R. Subanesh, T. R Aravindkkumar, K. S. Nareshkumar, S. Ragothaman, R. Riyana, V. R. Sanalkumar, Studies on Thrust Vector Control using Secondary Injection Sonic and Supersonic Jets, *Proceedings of 2nd International Conference on Mechanical, Electronics and Mechatronics Engineering*, June 17-18, 2013.
- [6] M. R. Heidari, A. Noorallahi, Liquid Injection Thrust Vector Control and Effective Parameters, *Journal of Development and promotion of Energetic Materials*, Vol. 3, No. 1, pp. 15-24, 2008. (In Persian فارسي)
- [7] M. R. Heidari, A. Noorallahi, A Review of Liquid Injection Thrust Vector Control Usage in Different Missiles, *Conference of Iranian Aerospace* Society, Tehran, Iran, 2008. (In Persian) (فارسی)
- [8] M. R. Heidari, A. Pouramir, Analysis of the Interaction of Side Jet Injection into the Main Nozzle Flow Field, *Journal of Energetic Materials*, Vol. 3, No. 1, pp. 57-68, 2009. (In Persian نفرسی)
- [9] M. R. Heidari, M. Hashemabadi, Aerodynamic Design Algorithm of Liquid Injection Thrust Vector Control, *Journal of Aerospace Systems Design*, Vol. 2, No.1, pp. 27-35, 2010. (In Persian فارسى)
- [10] M. R. Heidari, A. Pouramir, Numerical Simulation of Liquid Single Injection Thrust Vector, *Journal of Energetic Materials*, Vol. 6, No. 1, pp. 33-43, 2012. (In Persian) (فارسی)
- [11] M. R. Heidari, A. Pouramir, Injectors Arrangement and Injection Flow Distributions Analysis in Liquid Injection Method for Thrust Vector Control, *Journal of Energetic Materials*, Vol. 9, No. 1, pp.29-43, 2015. (In Persian (فارسی)
- [12] M. R. Najjari, M. R. Heidari, A. Pouramir, System Design and Manifold of a Thrust Vector Control System with Liquid Injection inside a Nozzle, Conferences of Modern Achievement on Aerospace and Related Sciences, Tehran, Iran, summer 2015. (In Persian نارسی)
- [13] M. R. Heidari, A. Pouramir, Investigation and Comparison effects of Fluid Injection Type in Thrust Vector Control, *Journal of Applied Fluid Mechanics* (*JAFM*), Vol. 9, No. 1, pp. 19-26, Jan. 2016.

جدول 7 مقایسه نتایج شبیهسازی حاضر با یک دادهی تجربی [1] **Table 7** The comparing between simulation and experimental results
[1]

L J					
درصد خطا	$F_{\rm s}/F_{\rm m}$	$W_{\rm s}/W_{\rm t}$	دبیجریان اصلی(kg/s)	دبی پاشش (kg/s)	
-	0.012	0.02	-	-	دادەھاى تجربى (1)
11%	0.0106	0.02	9.28	0.18	نتايجشبيەسازى (1)
-	0.021	0.035	-	-	دادەھاى تجربى (2)
11%	-	0.035	9.28	0.32	نتايجشبيەسازى (2)





شکل 22 نمودار مقایسه نتایج شبیهسازی این تحقیق با نتایج تجربی مرجع [1]

پیچیدگی طراحی کاسته شود و جزو ابعاد پر کاربرد باشند. میزان انحراف تراست موشک درحالت انژکتور 100% باز برابر 1.48 درجه میباشد که از حداقل میزان انحراف در نظر گرفتهشده در ورودی طراحی بیشتر میباشد. نتایج بررسیشده در این پژوهش شامل بررسی جریان در سیستم طراحیشده و در نهایت اثرات خروجی آن بر روی جریان اصلی نازل میباشد. در موقعیت پاشش جریان فرعی به سمت جریان اصلی نازل، ابتدا چگالی و فشار استاتیک در آن نقطه افزایش یافته و در ادامه چگالی و فشار نیز مانند یالهای فاقد پاشش به تدریج کاهش مییابد. بیشترین میزان افزایش چگالی بر روی یالهای داخلی نازل، مربوط به پاشش %100 میباشد که برابر 73 کیلوگرم پاشش انژکتورها داشتهاست. دما در مقطع پاشش دچار کاهشی شدید گردیده پاشش انژکتورها داشتهاست. دما در مقطع پاشش دچار کاهشی شدید گردیده