



طراحی سیستم کنترل بردار تراست به وسیله پاشش مایع داخل نازل و شبیه سازی عددی جریان وابسته

محمدرضا نجاری¹، محمدرضا حیدری^{2*}

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 3761396361@piaou.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 24 آبان 1394

پذیرش: 14 دی 1394

ارائه در سایت: 15 اسفند 1394

کلید واژگان:

طراحی سیستم

کنترل بردار تراست

پاشش مایع

شبیه سازی عددی جریان

منیفولد

چکیده

کنترل بردار تراست یکی از روش های کنترل موقعیت موشک هایی است که به کمک تراست ناشی از خروج گاز حرکت می کنند. همه روش های کنترل بردار تراست مستقل از نیروهای آیرودینامیکی اتمسفر هستند و تا زمانی که موتور دارای تراست باشد کارایی خود را حفظ می کنند. سیستم های پاشش ثانویه یکی از چهار روش عمده کنترل بردار تراست می باشد. این پژوهش ابتدا به شناسایی اجزاء و طراحی مفهومی کل 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 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 و نیز طراحی و بررسی پاشنده ها در سیستم کنترل بردار تراست به روش پاشش مایع درون نازل، پرداخته شده است. همچنین طراحی و شبیه سازی عددی در دو بخش سیستم پاشش و اثرات پاشش انژکتورها به داخل جریان اصلی مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج آن ارائه و اعتبارسنجی گردیده است. از دستاورد این تحقیق می توان به عنوان الگویی برای طراحی و تحلیل انواع سامانه های کنترل بردار تراست به روش پاشش سیال جانبی، بر روی انواع موشک ها با نازل های متفاوت، استفاده نمود.

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@piaou.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

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

ABSTRACT

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) is determined. 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 injector spray effects into the main flow are analyzed and the results are presented and validated. 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.

1- مقدمه

موشک های تاکتیکی برای تغییر سریع زاویه بردار تراست جهت هدف گیری در ارتفاع پایین در همان لحظات اولیه بعد از شلیک دانست. به علت سرعت پایین موشک در لحظات اولیه شلیک، روش های دیگر قابلیت این تغییر زاویه را ندارند. از دیگر مزایای این روش می توان به عملگرهای ساده و کوچک، با قابلیت عملکرد طولانی مدت، سادگی کنترل و عدم حساسیت نسبت به معایب وسایل مکانیکی مرتبط با این سیستم ها، مانند فرسایش، ذوب، انحراف و تغییر شکل 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 می پردازد. برای طراحی سیستم و اطمینان از صحت طراحی انجام شده، از روش حل عددی جریان استفاده شده است. یکی از مزایای برتری روش کنترل بردار تراست به وسیله پاشش مایع نسبت به دیگر روش های کنترل بردار تراست² را می توان قابلیت استفاده از این سامانه در

¹ LITVC

² TVC

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تغییر در میدان جریان یک نازل از طریق پاشش سیال ثانویه درون بخش واگرای نازل و در نتیجه تغییر بردار تراست می باشد.

روش کنترل بردار تراست به وسیله پاشش سیال جانبی، به کنترل جهت بردار تراست گازهای خروجی از نازل می پردازد. این نازل ممکن است بر روی یک موشک، فضاپیما، هواپیما، ماهواره بر و یا حتی اژدر نصب شده باشد. این روش برای وسایلی که در جو رقیق یا ماورا جو پرواز می کنند و فاقد کار آبی یا اثر نیروهای آیرودینامیکی هستند، استفاده فراوان دارد. برای کنترل راکت های ماهواره بر یا فضاپیما و همچنین خود ماهواره ها 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 موشک ها، مخصوصا موشک های سنگین، به دلیل پایین بودن سرعت حرکت، نیروهای آیرودینامیکی ناچیز هستند، لذا، یکی از راه های جلوگیری از انحراف موشک ها در این لحظات استفاده از روش TVC می باشد.

روش موسوم به پاشش ثانویه¹ از دهه 50 میلادی برای کنترل بردار تراست موتورهای سوخت جامد، مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش بردار تراست به وسیله تزریق سیال از سوراخ هایی در دیواره نازل، کنترل می شود. به طوری که تزریق سیال از سوراخ ها، سبب تغییر لایه مرزی نازل شده و همین امر جهت جریان گاز خروجی از نازل و توزیع فشار روی جداره ی داخلی نازل را تغییر داده و در نتیجه جهت بردار تراست را تغییر می دهد. گرین و همکارانش در سال 1963 آزمایش هایی پیرامون پاشش مایع درون نازل (در موقعیت های مختلف پاشش) انجام داده و میزان انحراف بردار نیروی تراست را به دست آوردند [1]. گزارش سال 1974 ناسا² تحت عنوان کنترل بردار تراست موشک سوخت جامد³ به ارائه طرحی برای موشک تیتان III⁴ پرداخته است [2]. مارتین و پاور در سال 1981 به ارائه طرحی برای سیستم LITVC شاتل اس آر بی⁵ پرداختند [3]. تی سوهاز و همکارانش در سال 2007 زیرسیستم های مربوط به یک موتور هیبریدی کوچک از قبیل سیستم پایش رانش، سیستم تغذیه سوخت، و تجهیزات زمینی سیستم کنترل بردار تراست با پاشش مایع را آزمایش نمودند [4]. سوبانش و همکارانش در سال 2013 اقدام به شبیه سازی عددی جریان نازل نمودند. از نتایج حاصل از این تحقیق می توان به پیدا کردن موقعیتی بهینه برای پاشش جریان فرعی اشاره نمود که موقعیت 20 درصد از طول کل نازل را موقعیتی مناسب برای پاشش جریان فرعی معرفی می کند. آن ها همچنین پاشش انژکتور جانبی با سرعت مافوق صوت را مناسب تر از پاشش انژکتور با سرعت نزدیک صوت دانسته اند [5].

در داخل کشور نیز حیدری و همکارانش طی سال های 2008 تا 2016 در زمینه ی تحقیق و بهینه سازی سیستم LITVC به نتایج مهمی دست یافتند. آن ها در گام اول تحقیقات به بررسی روش های مختلف TVC و مزایا و معایب روش کنترل بردار تراست با پاشش سیال جانبی پرداخته و سپس فیزیک جریان درون نازل و الگوریتم طراحی سیستم LITVC را مورد مطالعه قرار دادند [6-9]. ایشان در سال 2008 ابتدا روش های عمومی کنترل بردار تراست را مطالعه و دسته بندی نموده و ضمن مقایسه پارامترهای مختلف، جایگاه روش LITVC بین سایر روش ها را معرفی و معایب و مزایای همه

روش ها را با یکدیگر مقایسه نمودند [6]. سپس کاربرد روش LITVC در کلاس های مختلف موشک ها را بصورت آماری بررسی کرده و جدولی از مشخصات موشک های مختلف که از این زیرسیستم استفاده کرده اند را ارائه نمودند [7]. آن ها در سال 2009 با شبیه سازی جریان و نمایش متغیرهای وابسته مانند توزیعات 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 پدیده های 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 سیستم LITVC تدوین نمودند [9].

حیدری و همکاران در گام دوم تحقیقاتی خود به شبیه سازی 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]. آن ها در سال 2012 به بررسی اثر پاشش تک انژکتور فرئون بر بردار تراست موشک پرداخته و اثبات نمودند که مقدار بهینه دبی پاشش به شدت وابسته به موقعیت نقطه پاشش می باشد [10]. در ادامه در سال 2015 با مطالعه پاشش چند انژکتور، 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 نحوه ی توزیع آن بین پاشنده ها بر زاویه و میزان انحراف بردار تراست (نسبت نیروی جانبی به نیروی محوری) تأثیر بسزایی دارد [11]. آن ها 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 سه انژکتوری جریان فرعی بر روی جریان اصلی نازل را مورد مطالعه قرار دادند [12]. بالاخره در سال 2016 با مطالعه جنس سیال تزریقی، اثر انواع سیالات مانند هوا، آب، تترا اکسید نیتروژن⁶ و فرئون⁷ را 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 مطلوب ترین سیال ها برای استفاده در سیستم LITVC می باشد [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 وظیفه کنترل میزان پاشش را بر عهده دارند)، رگلاتور فشار یا شیر اطمینان⁸، تیغه درون تانک⁹، تانک چند بره یا آکومولاتور¹⁰، لوله ها، شیرهای رولیکی، دبی سنج¹¹، منیفولد¹²، مرکز فرمان¹³ و انژکتور¹⁴ می باشد. در این سیستم منبع

⁶ N₂O₄

⁷ CCl₂F₂

⁸ Pressure Regulator (Pressure Valve)

⁹ Blade

¹⁰ Accumulator

¹¹ Flow Meter

¹² Manifold

¹³ TVC Electrical Distribution Box (ECU)

¹⁴ Injector

¹ SITVC (Secondary Injection Thrust Vector Control)

² NASA

³ Solid Rocket

⁴ Titan III

⁵ Shuttle SRB

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

3-2- طراحی سیستمی اجزا

برای طراحی سیستم LITVC اجزا به صورتی بر روی نازل جانمایی شده است که تقریباً 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 در پایان به طرح نهایی سیستم، که در شکل 2 مشاهده می شود، رسیده است. در طرح‌های پیشین منابع گاز پرفشار و مخزن آکومولاتور به صورت استوانه‌ای شکل طراحی شده بود و نمی توانست مقدار مورد نیاز از سیال را با خود حمل نماید. استفاده از رگولاتور در یک طرف 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 این گونه نباشد میزان سیالی که در داخل منبع آکومولاتور می ماند عملاً غیر کاربردی بوده و موجب افزایش وزن موشک می شود. سیستم حاضر قابلیت حمل 24.22 کیلوگرم از سیال فرئون 12 را در مخزن آکومولاتور و حمل 0.76 کیلوگرم نیتروژن را در مخزن فشار بالا دارا می باشد. دو رگلاتور در نظر گرفته شده در بین دو مخزن به صورت متقارن با زاویه 180 درجه نسبت به یکدیگر نصب شده‌اند، بطوریکه جریان نیتروژن علاوه بر تقارن می تواند فشار یکنواختی را به تیغه آکومولاتور وارد سازد. میزان فشار در نظر گرفته شده برای رگولاتور با توجه به میزان پاشش جریان فرعی که 5% دبی جریان اصلی می باشد برابر 42.2 بار است. چهار شیر و انژکتور طراحی شده با زاویه 90 درجه نسبت به یکدیگر بر روی نازل نصب شده‌اند. جعبه فرمان در این سیستم با تحلیل شرایط مأموریت موشک و دستور دادن الکتریکی به شیر و انژکتورهای سیستم، موشک را در موقعیت بهینه قرار می دهد. نحوه قرارگیری اجزای سیستم پیرامون نازل در شکل 2 قابل مشاهده است.

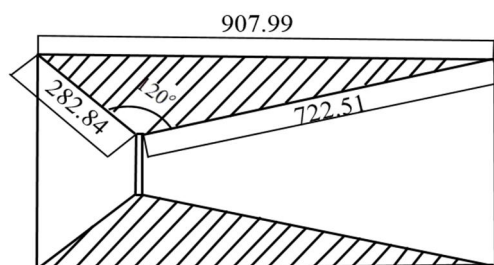


Fig. 1 Authorized space for locating of LITVC system

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

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

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 می سازد. برای کاهش فشار گاز مخزن نیتروژن و رسیدن به فشار مد نظر در مخزن فرئون، از یک رگلاتور تنظیم فشار استفاده شده است. دبی سیال با فشاری مشخص، توسط شیر هیدرولیک و انژکتور تعبیه شده قابل کنترل می باشد. شیر هیدرولیکی دبی سیال انژکتور را به وسیله کنترل موقعیت سوزن انژکتور کنترل می نماید. جعبه فرمان 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- ورودی‌های طراحی

در این تحقیق پارامترهای ورودی طراحی متناسب با کاربرد سیستم کنترل بردار تراست برای یک راکت نمونه برگزیده شده‌اند. از جمله این ورودی‌ها می توان 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 می شود، در محل در نظر گرفته شده پیرامون نازل انجام پذیرد. بعلاوه این سیستم به گونه‌ای طراحی می شود که مجموع زمان کارکرد سیستم در دبی‌های مختلف حداقل 3 ثانیه باشد و نیز میزان انحراف بردار تراست با استفاده از بیشترین دبی پاشش انژکتور حداقل به 1.2 درجه برسد.

2-2- مشخصات اولیه سیستم

پیکره بندی 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 داده شده است. این انژکتورها طبق مطالعات انجام شده در مرجع [13] در موقعیت 40 درصد طول نازل واگرا، قرار داده شده‌اند که موقعیتی بهینه برای عملکرد انژکتورها می باشد. شعاع نازل در مقطع پاشش برابر 149.8 میلی متر می باشد. مشخصات جریان در مقطع نزدیک پاشش با استفاده از روابط آیزنروویک 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 می باشد. 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 ضربه‌ای 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 در نظر گرفتن اثر سیال پاشش و همچنین مقدار و شرایط فیزیکی دیگر آن را بر روی جریان اصلی نازل ندارند و لذا استفاده از شبیه سازی عددی در موقعیت پاشش، برای به دست 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 به دست آوردن فشار محل پاشش در مقطع پاشش، با فرضیاتی چون شعاع پاشش 0.00698 متر و سیال پاشش فرئون 12 و دبی پاشش حدود 6.8 کیلوگرم صورت پذیرفته است. میزان فشار به دست آمده در مرز خروجی انژکتور، 12 بار می باشد. از این فشار برای طراحی سیستم کنترل

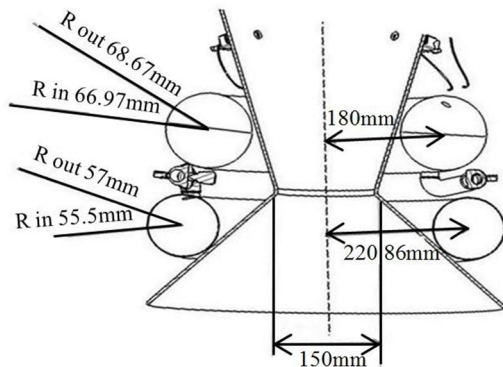


Fig. 3 The location of nitrogen and accumulator tanks on the nozzle
شکل 3 محل قرارگیری مخزن نیتروژن و آکومولاتور بر روی نازل

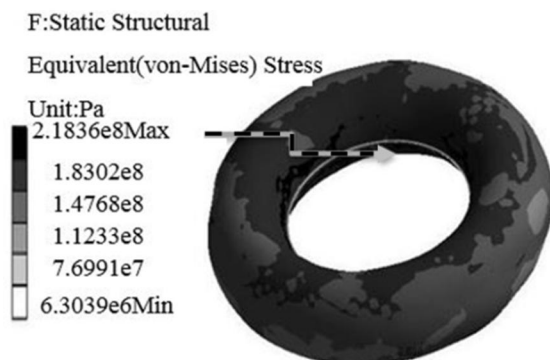


Fig. 4 Structural analysis of the nitrogen tank
شکل 4 شبیه سازی عددی سازه ای مخزن نیتروژن

این نوع سیستم را دارا باشد. از جمله این کارایی ها، توانایی عملکرد سریع در حدود 20 میلی ثانیه در فشارهای بالا می باشد. فشار انژکتور طبق مطالعات انجام شده باید در محدوده 30 تا 100 بار بوده و توانایی پاشش دبی های بالا را برخوردار باشد [3]. در این پژوهش اقدام به طراحی انژکتوری شده است که طرح اولیه آن براساس الگوی انژکتور استفاده شده در موشک تیتان III (معرفی شده در کتاب ناسا تحت عنوان معیارهای طراحی فضایی) می باشد. 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 به نام شیر انژکتور الکترومکانیکی معرفی می شود شامل یک شیر هیدرولیکی است که وظیفه آن تنظیم موقعیت سوزن انژکتور به وسیله فشار روغن و همچنین کنترل دبی جریان ورودی به انژکتور است. شکل 7 نمای برش خورده طولی از انژکتور حاضر را در حالت کاملاً باز نشان می دهد. انژکتور طراحی شده دارای سه مجرای خروجی به شعاع 4 میلی متر در هر کدام از خروجی ها می باشد. محاسبه عدد به دست آمده 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 طرح های اولیه انژکتور، میزان شعاع خروجی انژکتور به گونه ای طراحی شده بود که برای تأمین دبی مورد نظر 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 ارائه شده توجه ویژه ای به ورودی جریان نیز شده است به گونه ای که پس از چندین طراحی با شعاع های مختلف و زاویه های

با توجه نحوه جانمایی اجزا بر روی نازل و همچنین سایر شرایط موجود، مخزن نیتروژن فشار بالا دارای قطر داخلی 111 میلی متر می باشد. لوله های 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 میلی متر می باشد. قطر داخلی مخزن آکومولاتور نیز برابر 134 میلی متر است که توانایی حمل میزان سیال بیشتری نسبت به طراحی های پیشین خود را داراست.

در شکل 3 می توان نحوه قرارگیری دو مخزن نیتروژن و فرئون را مشاهده نمود. مشخصات کامل هندسی نازل نیز در ادامه خواهد آمد. لوله های اتصال مخزن آکومولاتور به سمت شیرها و انژکتورهای سیستم دارای شعاع داخلی 6.5 میلی متر می باشد 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 ضد زنگ AISI 4130 با استحکام کششی 435 مگاپاسکال، که دارای کاربرد در مخازن فشار بالاست، انجام پذیرفته است. شبیه سازی 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 کیلوگرم می باشد. میزان ضخامت محاسبه شده برای مخزن فرئون مطابق با شکل 5، با فشار داخلی 42.2 بار، برابر 1.7 میلی متر و وزن مخزن 6.7 کیلوگرم شده است.

طرح های اولیه سیستم کنترل بردار تراست به وسیله پاشش مایع در این پژوهش، همانطور که در شکل 6 مشاهده می شود دارای برخی معایب طراحی بودند که از جمله آن ها می توان 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 نمی تواند شروط ورودی سیستم (با پاشش حداقل 3 ثانیه) را ارضا نماید. طرح دیگر که با استفاده از مخازن استوانه ای طراحی شده و تعادل مناسبی نیز نسبت به طرح پیشین خود دارد، توانایی حمل میزان اندکی از فرئون را دارا می باشد و لذا مناسب مجموعه نیست. بالاخره بعد از چند طرح اولیه، یک طرح نهایی که در شکل 2 مشاهده شد، بدست آمد که از لحاظ تعادل و جابجایی بر روی نازل مناسب بوده و میزان حمل بیشترین مقدار سیال پاشش را نسبت به طرح های پیشین خود دارا می باشد.

2-4- طراحی انژکتور

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

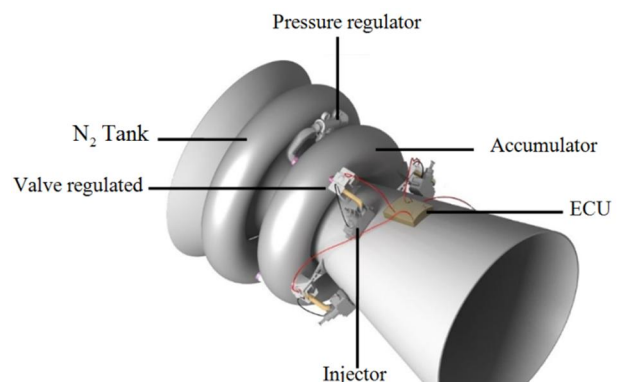


Fig. 2 The location of the components of LITVC system
شکل 2 محل قرارگیری اجزای سیستم LITVC

رابطه بین حرکت سوزن انژکتور و دبی 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 اندازه گیری شده است. همان طور که مشاهده می شود این انژکتور می تواند با جابجایی کمتر از 2.5 میلی متر از حالت کاملاً 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 مورد استفاده برای جریان در بخش شبیه سازی اول، مایع فرئون 12 می باشد. خواص این ماده در جدول 2 آورده شده است. این ماده واکنشی با گازهای درون نازل نخواهد داشت. از این رو در شبیه سازی های صورت گرفته واکنش شیمیایی بین این مواد مدل نمی گردد.

3-1- شبیه سازی جریان در بخش اول

در بخش اول شبیه سازی، برای ساده سازی و حل دقیق تر میدان جریان، ورودی های آکومولاتور 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 آکومولاتور در این سیستم، تأمین فشار سیال به صورت ثابت، به وسیله فشار

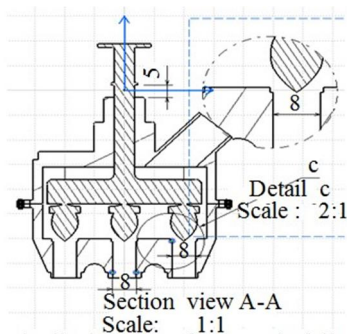


Fig. 7 The longitudinal section of injector in fully open attitude

شکل 7 مقطع طولی انژکتور در حالت کاملاً باز

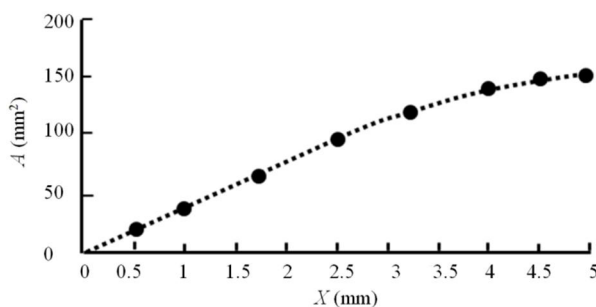


Fig. 8 The crossing sectional variations of flow vs. movement of the needle of injector

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

مختلف برای کانال جریان ورودی به داخل انژکتور و نیز شبیه سازی این جریان، ابعادی یدست آمده است که جریان سیال سیستم با کمترین اغتشاش در داخل انژکتور و با دبی تقریباً یکسان در سه مقطع خروجی انژکتور، در مسیرهای جریان ادامه یابد. ابعاد به دست آمده برای ورودی انژکتور به این صورت است که سیال در مجرای به شعاع 6.5 میلی متر و زاویه 48 درجه وارد انژکتور می شود. با توجه به هندسه در نظر گرفته شده برای طراحی انتهای سوزن انژکتور، بازه حرکتی سوزن انژکتور در راستای محور سوزن انژکتور، بین حالت کاملاً بسته و کاملاً باز 5 میلی متر شده است.

نتایج حاصل شده بیانگر این موضوع است که این انژکتور با سیال عبوری فرئون 12، در حالت کاملاً 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 به دست آمده برای منبع نیتروژن به صورتی حاصل گردیده است که یک انژکتور در حالت کاملاً باز قرار داده شده است و سه انژکتور دیگر کاملاً 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 تقریباً 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 غیرخطی است. نتایج حاصل از بررسی چندین موقعیت قرارگیری سوزن 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

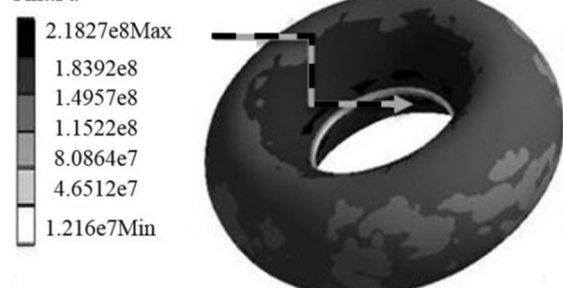


Fig. 5 Structural analysis of the Freon tank

شکل 5 شبیه سازی عددی سازه های مخزن فرئون

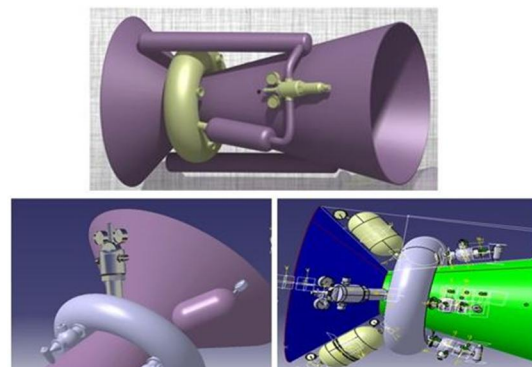


Fig. 6 The samples of initial designs of liquid injection thrust vector control system

شکل 6 نمونه هایی از طراحی های اولیه سیستم کنترل بردار تراست به وسیله پاشش مایع درون نازل

مورد بررسی قرار می گیرد. برای پارامترهای ورودی انژکتور، از نتایج به دست آمده در خروجی شبیه سازی بخش اول که در جدول 3 اشاره شده است، استفاده می شود. بدین صورت می توان نتایج حاصل از طراحی سیستم LITVC را مورد بحث قرارداد. هندسه نازل استفاده شده در این شبیه سازی 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 دایره ای به شعاع 6.92 میلی متر 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) برابر 3000 درجه کلوین است. از آنجا که رژیم جریان در این ناحیه 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 نازل شرط مرزی فشار خروجی اعمال می گردد. مقدار فشار و دما در این ناحیه (P_0 و T_0) برابر فشار و دمای محیط در نظر گرفته شده که به ترتیب 1 اتمسفر و 300 درجه کلوین می باشد.

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

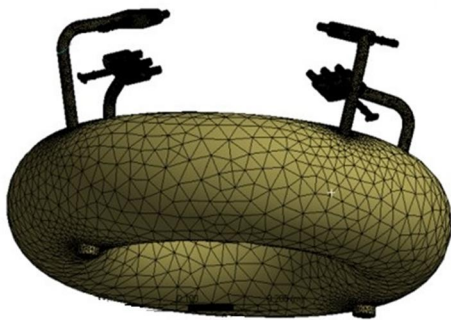


Fig. 10 The first part simulation grid

شکل 10 شبکه بندی استفاده شده در شبیه سازی بخش اول

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

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

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

گاز نیتروژن می باشد. فشار ورودی به گونه ای محاسبه شده است که دبی خروجی جریان انژکتور حداقل به 5% جریان اصلی نازل رسیده باشد. همچنین فشار در نظر گرفته شده در انتهای انژکتور، فشار محاسبه شده جریان داخل نازل، در مقطع قرارگیری انژکتورها در داخل نازل می باشد. لذا شرایط مرزی در مقطع خروجی انژکتورها به صورت فشار خروجی فرض می شود که تداعی کننده قرارگیری انژکتور در محیط نازل می باشد. فشار خروجی تک انژکتور طبق محاسبات انجام شده در زمان ایجاد شوک برابر با 12 بار است. در شبکه بندی جریان بخش اول که مرز آن در شکل 10 مشاهده می شود به دلیل نوع طراحی، امکان استفاده از سلول های با ساختار در تمام میدان جریان وجود ندارد. تعداد سلول های این شبکه 1417622 و تعداد گره های آن 291918 می باشد. در شبیه سازی جریان بخش اول، برای مدل سازی آشفتگی جریان، از مدل K- Ω استفاده شده است.

در شبیه سازی عددی جریان با نرم افزار 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 کاملاً بسته می باشد و دو انژکتور دیگر، پاشش سیال را انجام می دهند. نتایج حاصل از این شبیه سازی در بخش اول با فرضیاتی که در قسمت قبل به آن اشاره شد برای شش حالت مختلف از قرارگیری سوزن انژکتورها در جریان فرئون 12، در مقطعی نزدیک به خروجی انژکتورها محاسبه شده و در جدول 3 ارائه گردیده است. در این شبیه سازی ها با محاسبات انجام شده در بخش طراحی انژکتور، سوزن انژکتور در موقعیتی قرار می گیرد که دبی های مورد نظر حاصل گردد. از نتایج دبی و سرعت به دست آمده در این شبیه سازی ها، به عنوان پارامترهای ورودی انژکتور، برای پاشش به سمت جریان اصلی در شبیه سازی بخش دوم استفاده شده است.

3-2- شبیه سازی جریان در بخش دوم

در قسمت دوم شبیه سازی، برخورد جریان جانبی انژکتور با جریان اصلی نازل

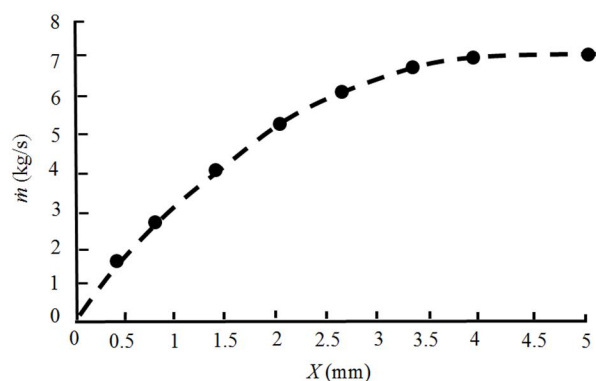


Fig. 9 The passing flow rate variations vs. movement of the needle of injector

شکل 9 نمودار تغییرات دبی عبوری جریان نسبت به حرکت سوزن انژکتور

جدول 2 خواص شیمیایی سیال پاشش (فرئون 12)

Table 2 Chemical properties of the fluid injection (Freon 12)

نام مایع	چگالی (kg/m ³)	C_p (J/kg.K)	جرم مولکولی (kg/kmol)
فرئون 12	1518.9	978.1	120.92

اشاره شده نمایش می دهد. همان طور که مشاهده می شود اثرات پاشش انژکتورهای مجاور روی جریان حوالی آن ها مشهود می باشد. دما در مقطع خروجی در بیشترین حالت خود که نزدیک به دیواره های نازل می باشد برابر با 1813 درجه کلوین است، این دما نسبت به دمای ورودی نازل که 3000 درجه کلوین در نظر گرفته شده، دچار افتی معادل 64 درصدی گردیده است. دما در کمترین میزان خود در مقطع خروجی، در راستای موقعیت های پاشش به مقدار 432 درجه کلوین می رسد.

در کانتورهای به دست آمده در مقطع طولی، می توان 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 می سازند، در چهار حالت فرض شده نشان می دهد. بیشترین سرعت ایجاد شده در صفحات مورد بررسی 2110 متر بر ثانیه می باشد. همان طور که ملاحظه می شود سرعت در نزدیک دیواره ها برابر صفر بوده و در نقاط پاشش نیز با بوجود آمدن پدیده شوک، سرعت جریان کاهش می یابد. در کانتورهای شکل 14، خصوصاً کانتور الف می توان به خوبی تغییرات سرعت در مقطع مختلف نازل را مشاهده نمود. همچنین رسیدن سرعت جریان نازل در مقطع گلوگاه به سرعت صوت (ماخ یک) و افزایش سرعت جریان بعد از گلوگاه به خوبی قابل مشاهده است.

در جدول 5 نتایج فشار خروجی و مؤلفه های سرعت در سه جهت در مقطع خروجی نازل ارائه شده است. همچنین مقادیر نیروی تراست محوری و نیروی تراست جانبی محاسبه شده و براساس آن میزان زاویه انحراف بردار تراست بدست آمده است. مقدار تراست 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 تراست 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 دبی جریان اصلی ورودی به نازل با دبی جریان جانبی پاشنده ها حاصل می شود. وضعیت برآیند سرعت جانبی در صفحه خروجی نازل نیز وابسته به تعداد و زاویه پاشنده های فعال است.

$$T_x = \dot{m}_t \times V_x + \Delta P_{exit} \times A_{exit} \quad (1)$$

$$T_s = \dot{m}_t \times V_r \quad \& \quad V_r = \sqrt{V_Y^2 + V_Z^2} \quad (2)$$

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 فرئون 12، چهار مسیر مطابق شکل 15 بر روی این دیواره نازل بررسی شده است. در زاویه های صفر تا 360 درجه با اختلاف 90 درجه نسبت به یکدیگر، از نقطه پاشش سیال جانبی قرار گرفته اند. مسیرهای زاویه صفر درجه و 90 درجه هم سطح انژکتور و مجاور بدنه می باشد. توزیع پارامترها درست در نزدیکی دیواره روی اولین شبکه میدان جریان به دست آمده و سرعت روی دیواره برابر صفر می باشد. اما نتایج مسیرهای 180 و 270 درجه دقیقاً منطبق بر دیواره نازل است.

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

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 دیواره ها آدیباتیک (بی درو) فرض شده است. مایع استفاده شده در جریان فرعی، فرئون 12 می باشد که خواص آن در جدول 2 آورده شد. سیال جریان اصلی استفاده شده درون نازل، هوا می باشد که خواص ترموفیزیکی آن در جدول 4 مشاهده می شود.

در شبکه بندی جریان بخش دوم که در شکل 12 مشاهده می شود از سلول های با ساختار در تمام این میدان استفاده شده است. تعداد سلول های این شبکه 71862 و تعداد گره های آن 75579 می باشد. برای حل جریان در این شبیه سازی از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استفاده شده است.

هندسه نازل در نظر گرفته شده برای شبیه سازی و همچنین محل پاشش جریان فرعی در شکل 12 مشاهده گردید. نتایج به دست آمده از شبیه سازی بخش اول، همان طور که در جدول 3 اشاره گردید، مربوط به شش تحلیل جریان می باشد. این تحلیل ها با ترکیبی از یکدیگر در چهار حالت مورد بررسی قرار می گیرند که این حالت ها عبارتند از:

الف: یک انژکتور در حالت 100% باز و سه انژکتور دیگر بسته است.
ب: دو انژکتور مجاور یکدیگر، در حالت 50% باز و دو انژکتور 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.

شکل 13 کانتور توزیع دما در مقطع خروجی نازل را برای چهار حالت

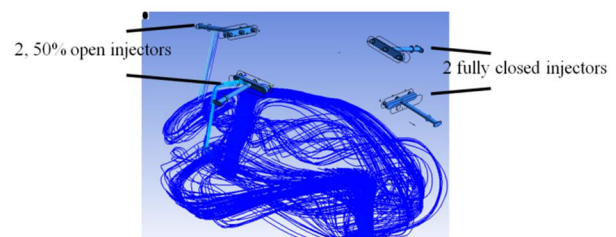


Fig. 11 The Freon flow stream lines in accumulators and injectors of the LITVC system

شکل 11 نمایش خطوط جریان فرئون 12 در سیستم آکومولاتور و انژکتورهای سیستم LITVC

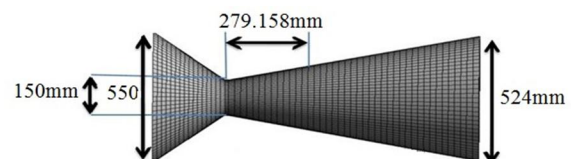


Fig. 12 The second part simulation grid

شکل 12 شبکه بندی استفاده شده در شبیه سازی بخش دوم

جدول 4 خصوصیات سیال هوا

Table 4 The air properties

پارامتر	مقدار	واحد
چگالی	گاز کامل	کیلوگرم بر مترمکعب
ظرفیت حرارتی ویژه	1006.43	ژول بر کیلوگرم درجه کلوین
ضریب هدایت حرارتی	0.0242	وات بر متر درجه کلوین
لزجت	0.0000178	کیلوگرم بر متر ثانیه
جرم مولکولی	28.966	کیلوگرم بر کیلومول

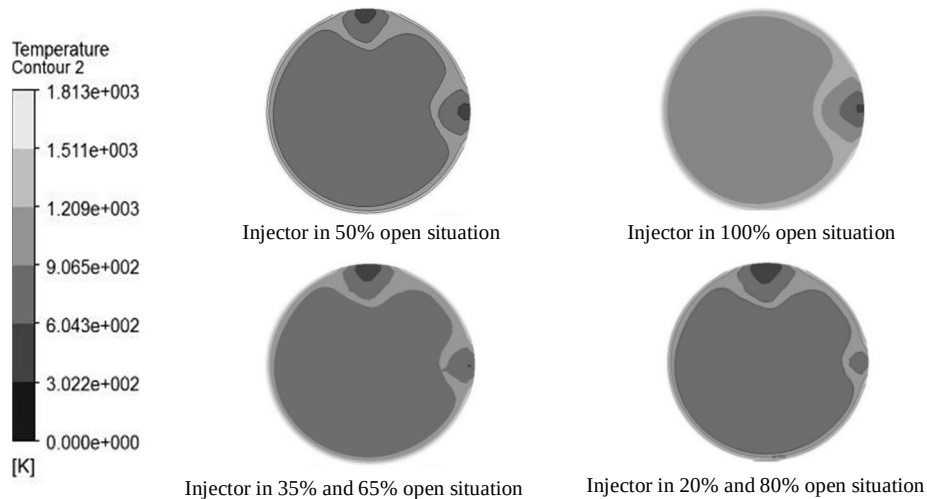


Fig. 13 The temperature distribution on output nozzle section for four case injections

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

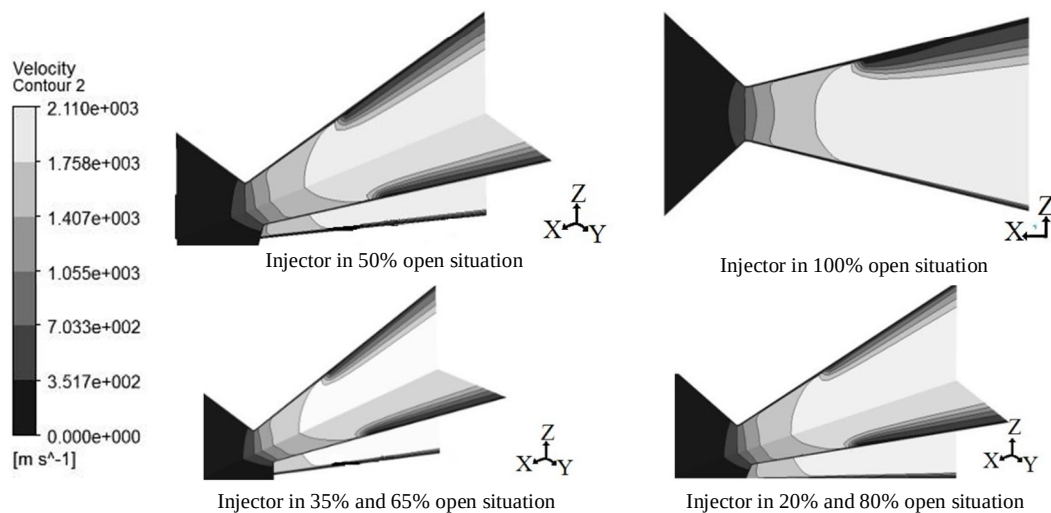


Fig. 14 The speed contours in injection pages in four cases selected

شکل 14 کانتور سرعت در صفحات پاشش در چهار حالت منتخب

برابر 3.7 بار می باشد، که با نتایج شکل 18 نسبتاً مطابقت دارد. میزان افزایش فشار در زمان ایجاد شوک در نقطه پاشش به عدد 12 بار می رسد.

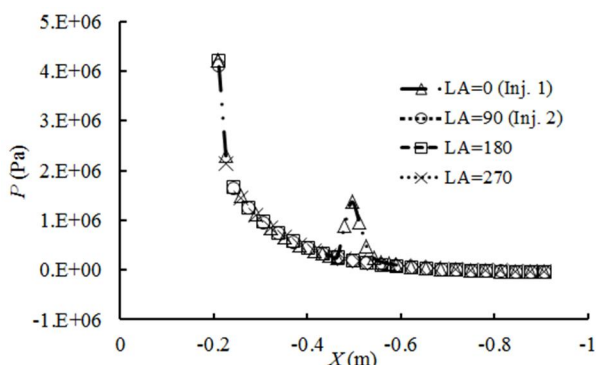


Fig. 16 The static pressure distribution on the divergent nozzle wall, while that injector 100% open

شکل 16 نمودار توزیع فشار استاتیک روی دیواره نازل واگرا در حالت انژکتور 100% باز

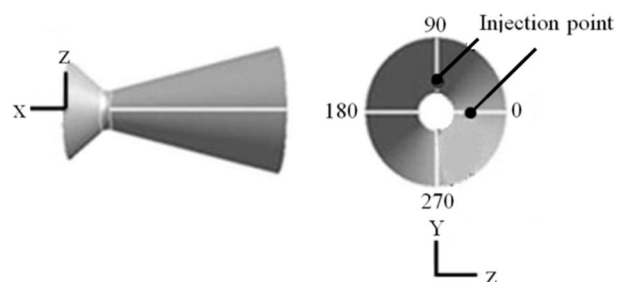


Fig. 15 The study paths on surface of divergent nozzle

شکل 15 مسیرهای مورد مطالعه روی دیواره نازل واگرا

موقعیت پاشش است. همان طور که در این شکل ملاحظه می شود در نقطه پاشش به علت شکل گیری پدیده شوک، فشار بالا رفته و با فاصله گرفتن از نقطه پاشش به حالت عادی خود بازمی گردد. سپس فشار بعد از شوک در یال پاشش صفر درجه با فشار در یال های 90، 180 و 270 درجه به همگرایی می رسد. در این شکل و شکل های بعد نماد LA مخفف Line Angle است. فشار طبق محاسبات انجام شده در جدول 1 در محل نزدیک به پاشش انژکتور

جدول 5 نتایج به دست آمده در تحلیل شبیه سازی دوم

Table 5 The numerical results of second part simulation

شماره حالت	الف	ب	ج	د
درصد دبی عبوری از دو انژکتور همسایه	100% and 0%	50% and 50%	20% and 80%	35% and 65%
دبی پاشنده ها (kg/s)	6.82	3.45 3.45	1.35 5.42	2.46 4.33
سطح مقطع خروجی (m^2)		0.21545	134.92	
دبی جریان اصلی نازل (kg/s)				
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 محوری	230396	232155	230544	230636
تراست جانبی	5984.8	4701.2	5198.3	4986.1
زاویه انحراف تراست	1.48	1.16	1.29	1.23

آن‌ها به 2500 درجه کلون می‌رسد. در دو یالی که پاشش در آن‌ها صورت نمی‌پذیرد دما با شیب یکسانی کاهش می‌یابد و در اثر پاشش در یال‌های دیگر این کاهش دچار تغییر محسوسی نمی‌شود. 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 می‌باشد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود چگالی تا

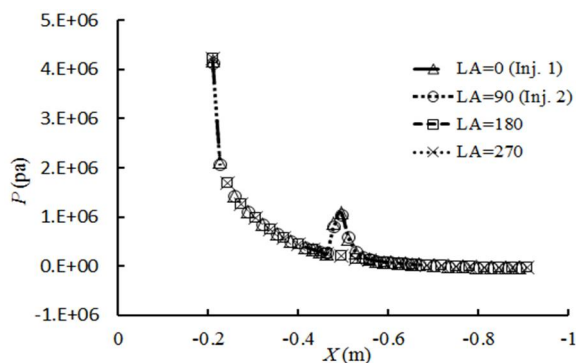


Fig. 17 The static pressure distribution on the divergent nozzle wall, while those two injectors 50% open

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

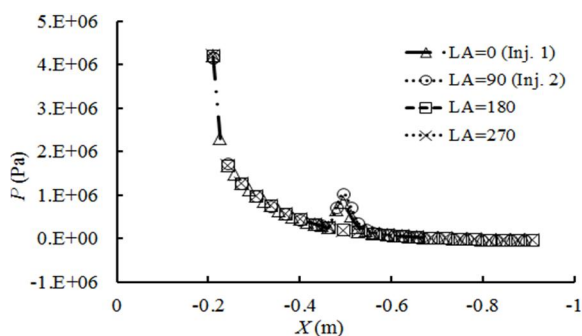
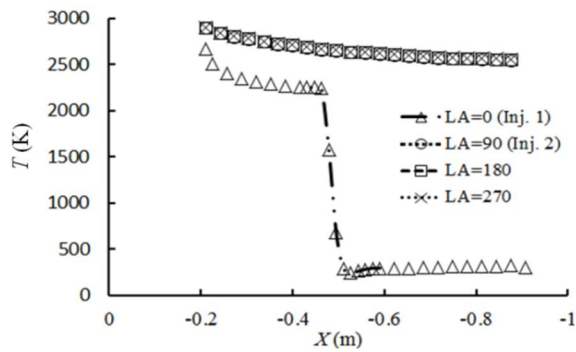


Fig. 18 The static pressure distribution on the divergent nozzle wall, while that one injector 65% and another one 35% open

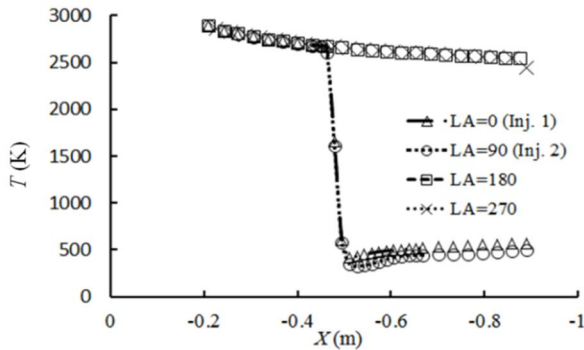
شکل 18 نمودار توزیع فشار استاتیک روی دیواره نازل و اگر در حالت انژکتور 35% و 65% باز

شکل‌های 17 و 18 و 19 نشان دهنده نمودار توزیع فشار بر روی دیواره نازل در حالت پاشش جفت انژکتور، برای سه حالت منتخب انژکتورها می‌باشد. این جفت انژکتور در حالت زاویه صفر و 90 درجه در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در شکل 17 ملاحظه می‌شود در نقطه پاشش به علت شکل گیری پدیده شوک، فشار بالا رفته و این تغییر فشار به علت پاشش یکسان انژکتورها به یک میزان تغییر کرده و همانند حالت پاشش تک انژکتور به فاصله گرفتن از نقطه پاشش به حالت عادی خود باز می‌گردد 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 می‌یابد میزان فشار حاصل از شوک در نقطه پاشش بیشتر می‌شود. میزان فشار در موقعیت بالادست نقطه پاشش تقریباً برابر 3 بار می‌باشد و میزان افزایش فشار بر روی یال‌های پاشش تا حدود 10 بار می‌رسد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مجدداً پاشش انژکتور جانبی تأثیری بر روند کاهشی فشار در دیگر یال‌های مورد بررسی ندارد. شکل 20 نشان دهنده نمودار توزیع دما بر روی دیواره نازل، در چهار حالت منتخب می‌باشد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود دما تا رسیدن به نقطه پاشش در یال‌هایی که پاشش از آن‌ها صورت نمی‌پذیرد دارای مقادیر یکسان بوده و یال‌های پاشش به دلیل اینکه 0.03 میلی‌متر از دیواره فاصله دارند، نسبت به سایر یال‌ها دارای دمای کمتری می‌باشند. این نتیجه گویای آن است که تغییرات دما به سوی محور نازل بسیار شدید می‌باشد. با پاشش سیال جانبی از یال‌های صفر و 90 درجه، دمای روی آن یال‌ها نسبتاً کاهش بیشتری یافته است.

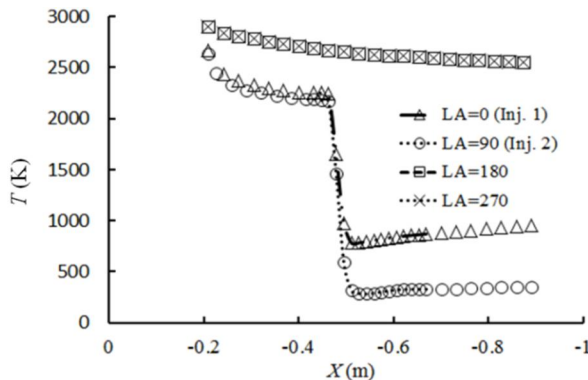
این موضوع وابسته به دمای سیال پاشش است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد یال‌های مورد بررسی از گلوگاه نازل تا مقطع خروجی نازل در نظر گرفته شده است و دمای نازل در گلوگاه نسب به دهانه ورودی نازل 100 درجه کلون کاهش یافته است. در موقعیت پاشش، دما بر روی یال‌ها تقریباً برابر 2000 درجه کلون می‌باشد که با دمای به دست آمده در جدول 1 در نقطه نزدیک پاشش اختلافی 500 درجه‌ای دارد. دما بر روی یال‌هایی که پاشش بر روی آن‌ها صورت می‌پذیرد در نقطه خروج از نازل، با توجه به میزان پاشش انژکتورها بین 300 الی 900 درجه کلون است. در یال‌هایی که پاشش در آن‌ها صورت نمی‌پذیرد در نقطه نزدیک به خروجی نازل دمای



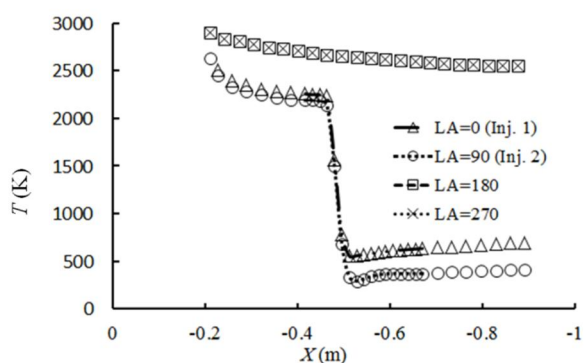
a: Injector in 100% open situation



b: Injector in 50% open situation



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 منتخب پاشش

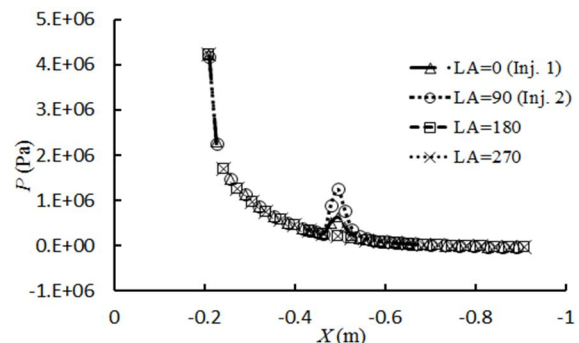
در این شکل محور افقی بیانگر نسبت دبی پاشش به دبی کل می باشد و محور عمودی نشان دهنده نسبت نیروی جانبی به نیروی تراست اصلی است. نکته

رسیدن به نقطه پاشش در چهار یال منتخب دارای مقادیری یکسان است و با پاشش سیال جانبی از یال های صفر و 90 درجه، در این یال ها 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 می باشد، اختلاف اندکی داشته و تأییدی بر صحت تحلیل این تحقیق است. میزان افزایش چگالی در موقعیت پاشش انژکتور 100% باز تقریباً 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 کاهش یافته و با دیگر یال های 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 به دست آمده در شکل های 16 تا 21 و مقایسه با جریان نازل بدون پاشش ثانویه، نشانگر آن است که با توجه به انتخاب مناسب پارامترهای پاشش، جریان روی دیواره ی روبروی نقطه پاشش متأثر از جت جانبی نمی باشد. این ویژگی مادام که شرایط پاشش به مقدار بحرانی و زاویه انحراف بردار تراست کمتر از مقدار بیشینه است، برقرار می باشد و در پاشش بحرانی، جریان ثانویه روی دیواره ی مقابل و سپس تمام جریان نازل اثری مخرب می گذارد.

4- اعتبار سنجی تحلیل

برای تایید نتایج به دست آمده در این تحقیق از نتایج کار آزمایشگاهی آقای گرین و همکارش استفاده شده است [1]. مشخصات هندسی و شرایط مرزی نازل استفاده شده در جدول 6 آمده است. سیال پاشش در این نازل فرئون 12 می 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 7 پارامترهای پاشش و تأثیر آن بر عملکرد نازل را نشان می دهد. پارامتر نسبت دبی پاشش به دبی کل و F_g/F_m نسبت نیروی جانبی به نیروی تراست محوری می باشد. نتایج شبیه سازی در دونقطه با نتایج تجربی مقایسه شده و در دبی پاشش 0.18 و 0.32 کیلوگرم بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. دبی جریان اصلی این نازل 9.28 کیلوگرم بر ثانیه می باشد و میزان اختلاف نتایج در شبیه سازی اول و دوم تقریباً 11% شده است.

در شکل 22 نتیجه شبیه سازی در دونقطه فوق الذکر ارائه شده 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

جدول 6 شرایط مرزی و هندسی نمونه آزمایشگاهی

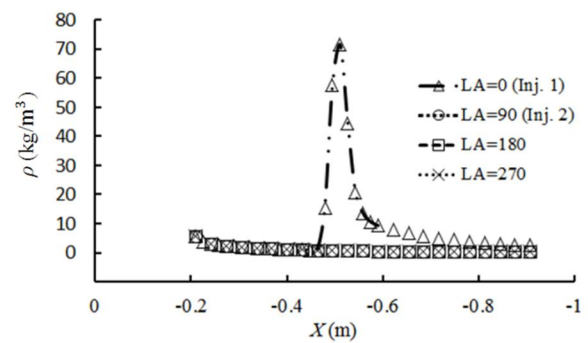
Table 6 Geometric and boundary conditions of experimental model (laboratory sample)

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

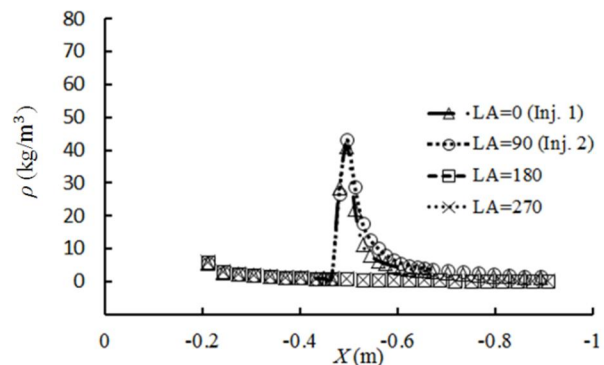
5- جمع بندی و نتیجه گیری

پارامترهای طراحی سیستم LITVC شامل مواردی همچون حجم موشک و نازل مورد استفاده و شرایط موتور موشک می باشد و لذا طراحی حجم این 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 می باشد. در طراحی حاضر سعی بر کمترین استفاده از مجاری ارتباطی گردیده است که علاوه بر کاهش وزن کلی مجموعه، از افت فشار سیال نیز جلوگیری شود. در طراحی اجزا توجه خاصی به مقارن سازی مجموعه گردیده، که علاوه بر تعادل کلی مجموعه، عملکرد بهتر اجزا را به دنبال خواهد داشت. استفاده از دو رگولاتور به صورت مقارن موجب یکنواختی فشار ورودی به داخل آکومولاتور شده که در نتیجه فشار یکسان در تمامی محیط آکومولاتور را در پی خواهد داشت. در این پژوهش با ثابت نگه داشتن پارامترهایی چون فشار مخزن که برابر 42.2 بار می باشد و دبی یکسان ورودی، اقدام به تحلیل جریان و بررسی نتایج گردیده است. میزان دبی مورد بررسی برای طراحی اجزا سیستم 5% دبی جریان اصلی می باشد که توانایی پاشش 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 میلی متر در نظر گرفته شده است. طراحی مخازن با استفاده از ورق فولاد ضد زنگ تمام استیل با تنش کششی 435 مگاپاسکال، و ضخامت مخازن نیتروژن و فرئون به ترتیب 1.5 و 1.7 میلی متر در نظر گرفته شده که با ضریب اطمینان 2 توانایی تحمل فشارهای داخلی مخازن را دارند. وزن دو مخزن با یکدیگر برابر 12.5 کیلوگرم است که از میزان در نظر گرفته شده در ورودی های سیستم کمتر می باشد.

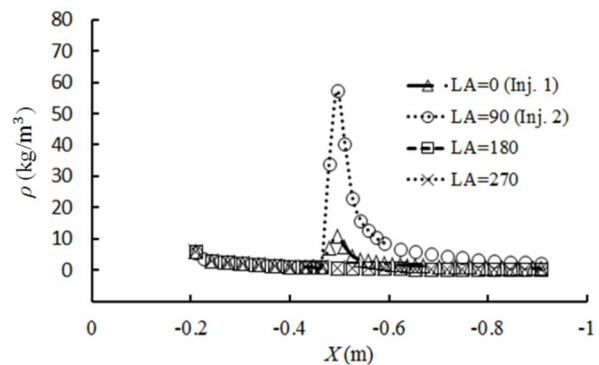
میزان ابعاد مجاری ارتباطی بین اجزا به صورتی در نظر گرفته شده که از



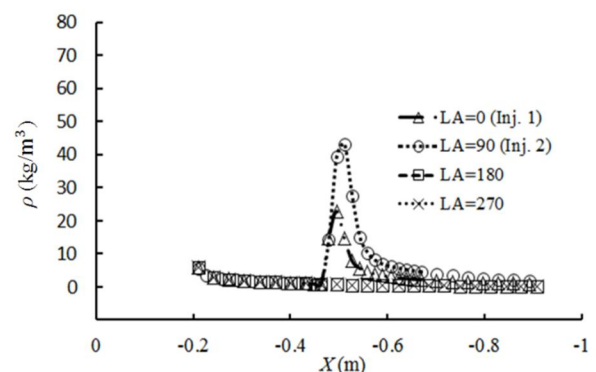
a: Injector in 100% open situation



b: Injector in 50% open situation



c: Injector in 20% and 80% 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 داده های دقیق ورودی مسئله، نتایج تا حدودی با هم اختلاف دارند. با این وجود مقدار خطا قابل قبول می باشد.

نازل تفاوت دارد. در دیگر یال ها که پاشش در آن ها 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 موشک ها خواهد بود.

6- مراجع

- [1] C. J. Green, F. McCullough, Liquid Injection Thrust Vector Control, *AIAA Journal*, Vol. 1, No. 3, pp. 573-578, 1963.
- [2] W. Howard. Duglass, NASA Space Vehicle Design Criteria, *Solid Rocket Thrust Vector Control*, pp.70-103, December 1974.
- [3] C. L. Martin, L. B. Powers, *Feasibility Study of LITVC for Shuttle SRB*, NASA-TP-1912, Sep. 1981.
- [4] J. Tsohas, L. J. Droppers, E. Glean, E. M. Dambash, S. D. Heister, Progress in Technology Demonstration for a Small Hybrid Launch Vehicle, *Proceedings of 5th Responsive Space Conference*, April 2007.
- [5] Sh. R. Subanesh, T. R. Aravindkumar, 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. Noorollahi, 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 فارسی)
- [7] M. R. Heidari, A. Noorollahi, 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 فارسی)
- [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 فارسی)
- [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 فارسی)
- [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 شبیه سازی حاضر با یک داده ی تجربی [1]

Table 7 The comparing between simulation and experimental results [1]

درصد خطا	F_s/F_m	W_s/W_t	دبی جریان اصلی (kg/s)	دبی پاشش (kg/s)	
-	0.012	0.02	-	-	داده های تجربی (1)
11%	0.0106	0.02	9.28	0.18	نتایج شبیه سازی (1)
-	0.021	0.035	-	-	داده های تجربی (2)
11%	-	0.035	9.28	0.32	نتایج شبیه سازی (2)

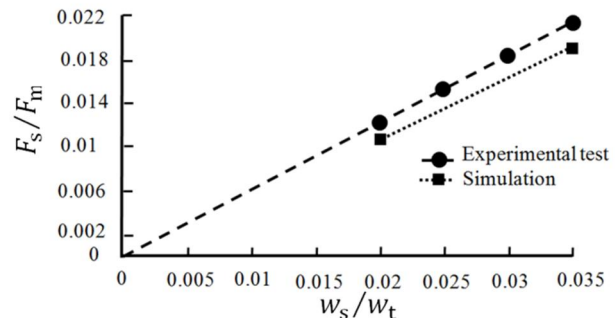


Fig. 22 The diagram of comparing between simulation and experimental results [1]

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

پیچیدگی طراحی کاسته شود و جزو ابعاد پر کاربرد باشند. میزان انحراف تراست موشک در حالت انژکتور 100% باز برابر 1.48 درجه می باشد که از حداقل میزان انحراف در نظر گرفته شده در ورودی طراحی بیشتر می باشد. نتایج بررسی شده در این پژوهش شامل بررسی جریان در سیستم طراحی شده و در نهایت اثرات خروجی آن بر روی جریان اصلی نازل می باشد. 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 یال های فاقد پاشش به تدریج کاهش می یابد. بیشترین میزان افزایش چگالی بر روی یال های داخلی نازل، مربوط به پاشش 100% می باشد که برابر 73 کیلوگرم بر مترمکعب است. میزان افزایش چگالی ارتباط مستقیمی با میزان دبی پاشش انژکتورها داشته است. دما در مقطع پاشش دچار کاهشی شدید گردیده و به تدریج کمی افزایش می یابد، ولی تا انتهای نازل با دمای دیگر یال های