



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

محمد رضا نجاری¹، محمد رضا 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

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 مینی فولد 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.

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

مینی فولد

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 می‌باشد.

روش کنترل بردار تراست به‌وسیله پاشش سیال جانبی، به کنترل جهت بردار تراست گازهای خروجی از نازل می‌پردازد. این نازل ممکن است بر روی یک موشک، فضاپیما، هواپیما، ماهواره بر و یا حتی اژدر نصب‌شده باشد. این روش برای وسایلی که در جو رقیق یا ماورا جو پرواز می‌کنند و فاقد کار آبی یا اثر نیروهای آیرودینامیکی هستند، استفاده فراوان دارد. برای کنترل راکت‌های ماهواره‌بر یا فضاپیما و همچنین خود ماهواره‌ها که در خارج جو نمی‌توانند از نیروهای آیرودینامیک استفاده کنند، TVC تنها راه قابل‌تصور است.

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

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 به‌وسیله تزریق سیال از سوراخ‌هایی در دیواره نازل، کنترل می‌شود. 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 جداره داخلی نازل را تغییر داده و در نتیجه 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 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 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 مایع را آزمایش نمودند [4]. سوبانش و همکارانش در سال 2013 اقدام به شبیه‌سازی عددی جریان نازل نمودند. از نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان 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 می‌کند. آن‌ها همچنین پاشش انژکتور جانبی با سرعت مافوق صوت را مناسب‌تر از پاشش انژکتور با سرعت نزدیک صوت دانسته‌اند [5].

در داخل کشور نیز حیدری و همکارانش طی سال‌های 2008 تا 2016 در زمینه 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 فیزیک جریان درون نازل و الگوریتم طراحی سیستم LITVC را مورد مطالعه قرار دادند [6-9]. ایشان در سال 2008 ابتدا روش‌های 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 جدولی از مشخصات موشک‌های مختلف که از این زیرسیستم استفاده کرده‌اند را ارائه نمودند [7]. آن‌ها در سال 2009 با شبیه‌سازی 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 پدیده‌های دینامیک گازی حاصل از اندرکنش بین دو جریان، مانند تشکیل شوک بیضی‌گون 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 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 نحوه‌ی 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 نیروی محوری) تأثیر بسزایی 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 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 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 وظیفه کنترل میزان پاشش را بر عهده‌دارند)، رگلاتور فشار یا شیر اطمینان⁸، تیغه درون تانک⁹، تانک چند بره یا آکومولاتور¹⁰، لوله‌ها، شیرهای رولیکی، دبی‌سنج¹¹، منیفولد¹²، مرکز فرمان¹³ و انژکتور¹⁴ می‌باشد. 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 می‌شود.

2-3- طراحی سیستمی اجزا

برای طراحی سیستم LITVC اجزا به صورتی بر روی نازل جانمایی شده‌است 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 می‌شود، رسیده است. در طرح‌های پیشین منابع گاز پرفشار و مخزن آکومولاتور به صورت استوانه‌ای شکل طراحی شده بود و نمی‌توانست 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 نقض‌های 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 عملاً غیر کاربردی بوده و موجب افزایش وزن موشک می‌شود. 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 می‌باشد. 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 می‌تواند 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 می‌باشد 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 می‌دهد. نحوه قرارگیری اجزای سیستم پیرامون نازل در شکل 2 قابل مشاهده است.

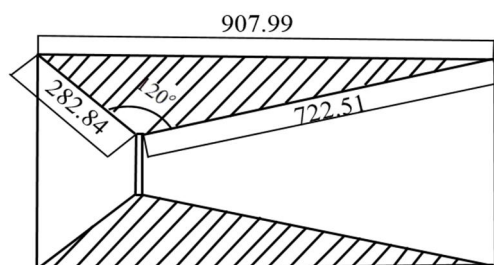


Fig. 1 Authorized space for locating of LITVC system

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 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 به وسیله کنترل موقعیت سوزن انژکتور کنترل می‌نماید. 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.

2-1- 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 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 در نظر 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 با استفاده از بیشترین دبی پاشش انژکتور حداقل به 1.2 درجه برسد.

2-2- مشخصات اولیه سیستم

پیکره‌بندی اجزای سیستم کنترل بردار تراست به روش مایع درون نازل، در فضای اطراف نازل صورت می‌پذیرد. 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 می‌باشد. شعاع نازل در مقطع پاشش برابر 149.8 میلی‌متر می‌باشد. مشخصات جریان در مقطع نزدیک پاشش با استفاده از روابط آیزنروپیک 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 کم‌انرژی تولید می‌شود و لذا این فرضیه قابل طرح است که شاید بتوان از روابط موج ضربه‌ای قائم برای محاسبه این فشار در نوک موج کم‌انرژی 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 شبیه‌سازی عددی در موقعیت پاشش، برای به‌دست آوردن شرایط جریان ضروری می‌باشد. در بخش شبیه‌سازی عددی درباره تغییرات فشار در نازل به صورت کامل بحث می‌شود. شبیه‌سازی عددی صورت گرفته برای به‌دست 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 به‌دست آمده در مرز خروجی انژکتور، 12 بار می‌باشد. از این فشار برای طراحی سیستم کنترل

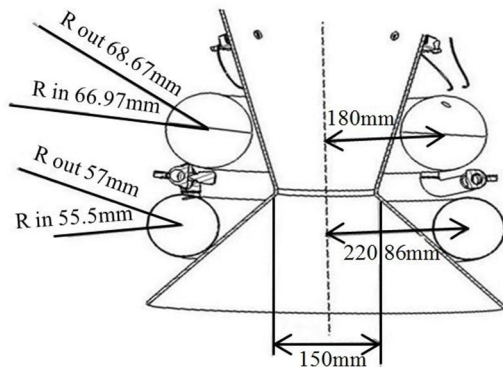


Fig. 3 The location of nitrogen and accumulator tanks on the nozzle
شکل 3 محل قرارگیری مخازن نیتروژن و آکومولاتور بر روی نازل

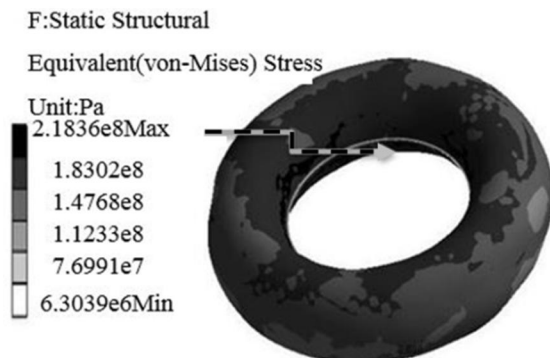


Fig. 4 Structural analysis of the nitrogen tank
شکل 4 شبیه‌سازی عددی سازه‌ی مخزن نیتروژن

این نوع سیستم را دارا باشد. از جمله این کاربری‌ها، توانایی عملکرد سریع در حدود 20 میلی‌ثانیه در فشارهای بالا می‌باشد. 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 بر اساس الگوی انژکتور استفاده‌شده در موشک تیتان III (معرفی‌شده در کتاب ناسا تحت عنوان معیارهای طراحی فضایی) می‌باشد. در این طراحی با وجود نداشتن ابعاد دقیق انژکتور سعی بر طراحی متناسب با الگوی موجود شده است. نسبت ابعادی اجزای تشکیل‌دهنده این انژکتور با انژکتور مذکور تطابق نسبی دارد. این مجموعه که به نام شیر انژکتور الکترومکانیکی معرفی می‌شود 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 می‌دهد. انژکتور طراحی‌شده دارای سه مجرای خروجی به شعاع 4 میلی‌متر در هر کدام از خروجی‌ها می‌باشد. محاسبه عدد به‌دست‌آمده برای شعاع خروجی انژکتور بر اساس مطالعات صورت‌گرفته در شبیه‌سازی جریان برای نازلی مشابه بوده است [11]. البته طرح ارائه‌شده در این مقاله طرح نهایی است. در طرح‌های اولیه انژکتور، میزان شعاع خروجی انژکتور به گونه‌ای طراحی‌شده بود که برای تأمین دبی موردنظر پاشش جریان فرعی، باید فشار منبع نیتروژن در فشاری خارج از فشار مجاز در نظر گرفته‌شده برای سیستم قرار می‌گرفت. این مسئله باعث بروز خطا در طراحی سیستم می‌گردید.

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

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 گرفته‌شده‌اند 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 صورت‌گرفته برای بدست آوردن میزان ضخامت مخزن نیتروژن، با فشار داخلی 50 بار مطابق شکل 4 دارای ضخامت 1.5 میلی‌متر و وزن 5.8 کیلوگرم می‌باشد. میزان ضخامت محاسبه‌شده برای مخزن فرئون مطابق با شکل 5، با فشار داخلی 42.2 بار، برابر 1.7 میلی‌متر و وزن مخزن 6.7 کیلوگرم شده است.

طرح‌های اولیه سیستم کنترل بردار تراست به وسیله 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. بالآخره 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 طرح‌های پیشین خود دارا می‌باشد.

2-4 طراحی انژکتور

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

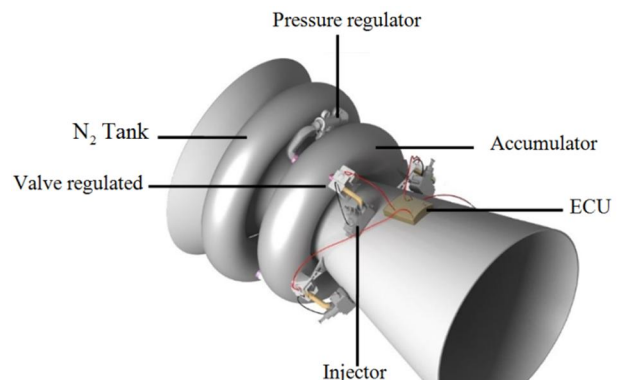


Fig. 2 The location of the components of LITVC system
شکل 2 محل قرارگیری اجزای سیستم LITVC

رابطه بین حرکت سوزن انژکتور و دیدی 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 کاملاً بسته، به دبی بالاتر از 5 کیلوگرم بر ثانیه برسد.

3- شبیه‌سازی جریان سیستم LITVC

در این پژوهش، شبیه‌سازی جریان سیستم در دو بخش کلی صورت می‌پذیرد. بخش اول شامل شبیه‌سازی جریان عبوری سیال از ابتدای ورودی آکومولاتور تا انتهای خروجی انژکتورها می‌باشد که با استفاده از این شبیه‌سازی، فشار مخزن فرئون تعیین می‌گردد و رفتار انژکتور مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بخش دوم شبیه‌سازی شامل، بررسی برخورد جریان جت جانبی با جریان اصلی نازل است. با استفاده از این شبیه‌سازی می‌توان صحت عملکرد طراحی با توجه به ورودی‌های طراحی را بررسی نمود. از جمله نتایج به دست آمده در این بخش می‌توان به میزان تغییر بردار تراست با توجه به طراحی انجام شده اشاره نمود. سیال مورد استفاده برای جریان در بخش شبیه‌سازی اول، مایع فرئون 12 می‌باشد. خواص این ماده در جدول 2 آورده شده است. این ماده واکنشی با گازهای درون نازل نخواهد داشت. از این رو در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته واکنش شیمیایی بین این مواد مدل نمی‌گردد.

3-1- شبیه‌سازی جریان در بخش اول

در بخش اول شبیه‌سازی، برای ساده‌سازی و حل دقیق‌تر میدان جریان، ورودی‌های آکومولاتور به‌عنوان مقطع ورود جریان سیال در نظر گرفته و از غشای درون آن صرف‌نظر می‌شود. این فرض ساده‌ساز را می‌توان به عنوان فرض صحیحی در حل جریان در نظر گرفت، زیرا که وظیفه غشای داخل آکومولاتور در این سیستم، تأمین فشار سیال به‌صورت ثابت، به‌وسیله فشار

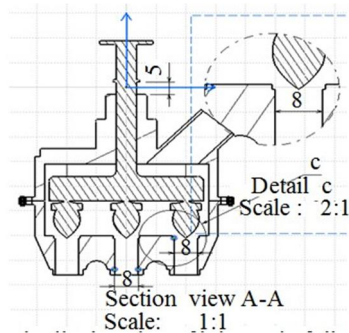


Fig. 7 The longitudinal section of injector in fully open attitude

شکل 7 مقطع طولی انژکتور در حالت کاملاً باز

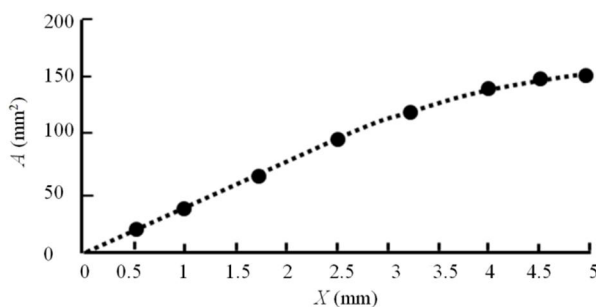


Fig. 8 The crossing sectional variations of flow vs. movement of the needle of injector

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

مختلف برای کانال جریان ورودی به داخل انژکتور و نیز شبیه‌سازی 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 به‌دست‌آمده برای ورودی انژکتور به این صورت است که سیال در مجرای به شعاع 6.5 میلی‌متر و زاویه 48 درجه وارد انژکتور می‌شود. با توجه به هندسه در نظر گرفته‌شده برای طراحی انتهای سوزن انژکتور، بازه حرکتی سوزن انژکتور در راستای محور سوزن انژکتور، بین حالت کاملاً بسته و کاملاً باز 5 میلی‌متر شده است.

نتایج حاصل‌شده 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 به‌دست‌آمده برای منبع نیتروژن به صورتی حاصل گردیده است که یک انژکتور در حالت کاملاً باز قرار داده‌شده است و سه انژکتور دیگر کاملاً بسته می‌ماند. حال با این شرایط، فشار مخزن نیتروژن به صورتی تنظیم می‌گردد که دبی سیال خروجی از انژکتور به مقدار دلخواه خود برسد. حرکت سوزن انژکتور تقریباً تا فاصله 1.5 میلی‌متر از حرکت خود دارای رفتاری خطی نسبت به سطح مقطع عبور جریان می‌باشد 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 می‌دهد و بر اساس آن می‌توان رفتار این سوزن را در موقعیت دلخواه به دست آورد.

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

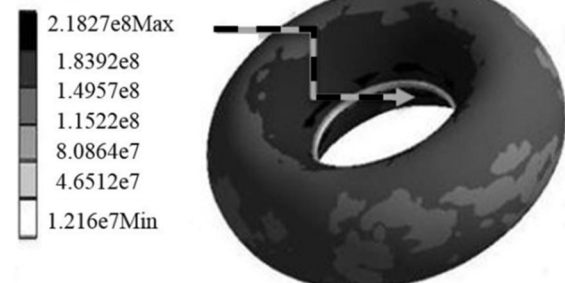


Fig. 5 Structural analysis of the Freon tank

شکل 5 شبیه‌سازی عددی سازه‌های مخزن فرئون

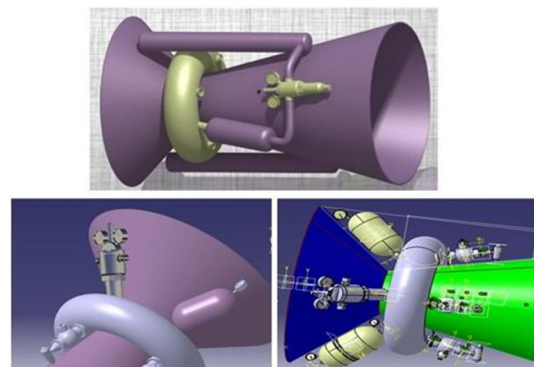


Fig. 6 The samples of initial designs of liquid injection thrust vector control system

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

مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای پارامترهای ورودی انژکتور، از نتایج به‌دست‌آمده در خروجی شبیه‌سازی بخش اول که در جدول 3 اشاره شده 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 نزدیک‌بودن فاصله پاشش 3 خروجی انژکتور، سطح مقطع معادلی از این سه خروجی به میزان دایره‌ای به شعاع 6.92 میلی‌متر در نظر گرفته‌شده است و پاشش سیال از داخل یک مجرا به شعاع ذکر شده انجام می‌پذیرد. این انژکتور سیال را در دایره‌ای به شعاع مشخص، با زاویه عمود بر محور اصلی نازل و دبی و سرعت مشخص به داخل جریان پاشش می‌نماید. شرایط مرزی حاکم بر مرزهای نازل این گونه است که در مرز ورودی قسمت همگرای نازل شرط مرزی فشار ورودی قرار داده می‌شود. 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 مادون‌صوت (یا نزدیک به صوت) می‌باشد، 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 می‌گردد. 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 می‌باشد.

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 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 می‌شود. زاویه

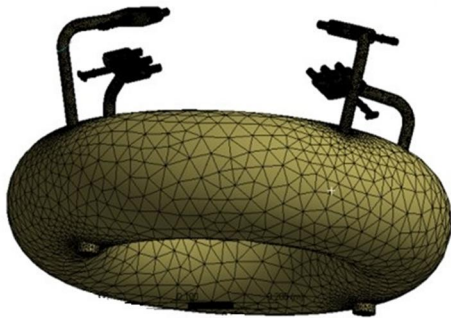


Fig. 10 The first part simulation grid

شکل 10 شبکه‌بندی استفاده‌شده در شبیه‌سازی 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

سرعت (m/s)	دبی محاسبه‌شده (kg/s)	درصد دبی عبوری جریان 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%

گاز نیتروژن می‌باشد. فشار ورودی به‌گونه‌ای 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 به‌صورت فشار خروجی فرض می‌شود که تداعی‌کننده قرارگیری انژکتور در محیط نازل می‌باشد. فشار خروجی تک‌انژکتور طبق محاسبات انجام‌شده در زمان ایجاد شوک برابر با 12 بار 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 1417622 و تعداد گره‌های آن 291918 می‌باشد. در شبیه‌سازی جریان بخش اول، برای مدل‌سازی آشفتگی جریان، از مدل $K-\Omega$ استفاده‌شده است.

در شبیه‌سازی عددی جریان با نرم‌افزار فلوئنت برای این پژوهش پنج جزء در نظر گرفته‌شده است. این اجزا شامل چهار سوزن انژکتور و محل گذر جریان فرئون 12 به‌صورت یکپارچه از ابتدای ورودی آکومولاتور تا انتهای خروجی انژکتورها می‌باشد. در این شبیه‌سازی با فرض ثابت ماندن فشار ورودی و فشار خروجی، با تغییر در موقعیت سوزن انژکتورها اقدام به شبیه‌سازی جریان می‌شود. در شبیه‌سازی انجام‌شده، مطابق شکل 11، دو انژکتور مجاور همیشه در حالت کاملاً بسته می‌باشد و دو انژکتور دیگر، پاشش سیال را انجام می‌دهند. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی 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 شبیه‌سازی‌ها با محاسبات انجام‌شده در بخش طراحی انژکتور، سوزن انژکتور در موقعیتی قرار می‌گیرد که دبی‌های موردنظر حاصل گردد. از نتایج دبی و سرعت به‌دست‌آمده در این شبیه‌سازی‌ها، به‌عنوان پارامترهای ورودی انژکتور، برای پاشش به سمت جریان اصلی در شبیه‌سازی بخش دوم استفاده شده‌است.

3-2- شبیه‌سازی جریان در بخش دوم

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

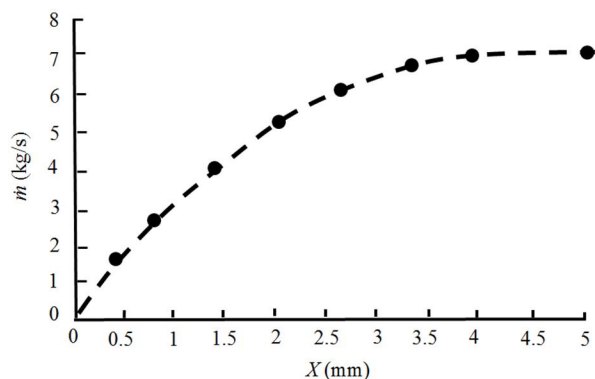


Fig. 9 The passing flow rate variations vs. movement of the needle of injector

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 ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)	جرم مولکولی (kg/kmol)
فرئون 12	1518.9	978.1	120.92

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 آدیباتیک (بی‌درو) فرض شده است. مایع استفاده‌شده در جریان فرعی، فروئون 12 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 $k-\epsilon$ استفاده شده است. هندسه نازل در نظر گرفته‌شده برای شبیه‌سازی و همچنین محل پاشش جریان فرعی در شکل 12 مشاهده گردید. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی بخش اول، همان‌طور که در جدول 3 اشاره گردید، مربوط به شش تحلیل جریان می‌باشد. این تحلیل‌ها با ترکیبی از یکدیگر در چهار حالت موردبررسی قرار می‌گیرند که 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 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

در جدول 5 نتایج فشار خروجی و مؤلفه‌های 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 می‌شود 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 می‌باشد. 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 می‌آید. دبی جریان خروجی از مجموع دبی جریان اصلی ورودی به نازل با دبی جریان جانبی پاشنده‌ها حاصل می‌شود. وضعیت برآیند سرعت جانبی در صفحه خروجی نازل نیز وابسته به تعداد و زاویه پاشنده‌های فعال است.

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

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

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 فروئون 12، چهار مسیر مطابق شکل 15 بر روی این دیواره نازل بررسی شده است. در زاویه‌های صفر تا 360 درجه با اختلاف 90 درجه نسبت به یکدیگر، از نقطه پاشش سیال جانبی قرار گرفته‌اند. 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 دقیقاً منطبق بر دیواره نازل است.

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

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

شکل 12 شبکه‌بندی استفاده‌شده در شبیه‌سازی بخش دوم

جدول 4 خصوصیات سیال هوا

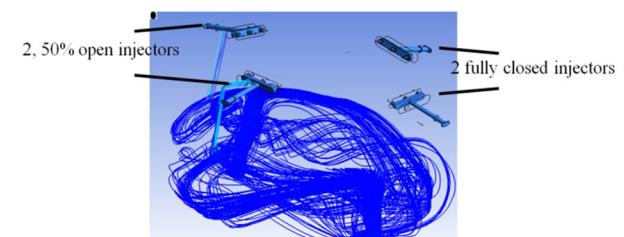


Fig. 11 The Freon flow stream lines in accumulators and injectors of the LITVC system

شکل 12 شبکه‌بندی استفاده‌شده در شبیه‌سازی بخش دوم

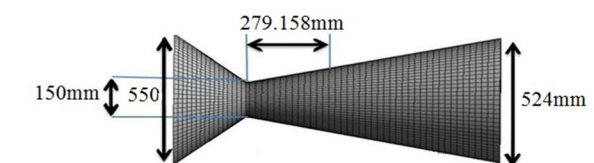


Fig. 12 The second part simulation grid

شکل 12 شبکه‌بندی استفاده‌شده در شبیه‌سازی بخش دوم

Table 4 The air properties

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

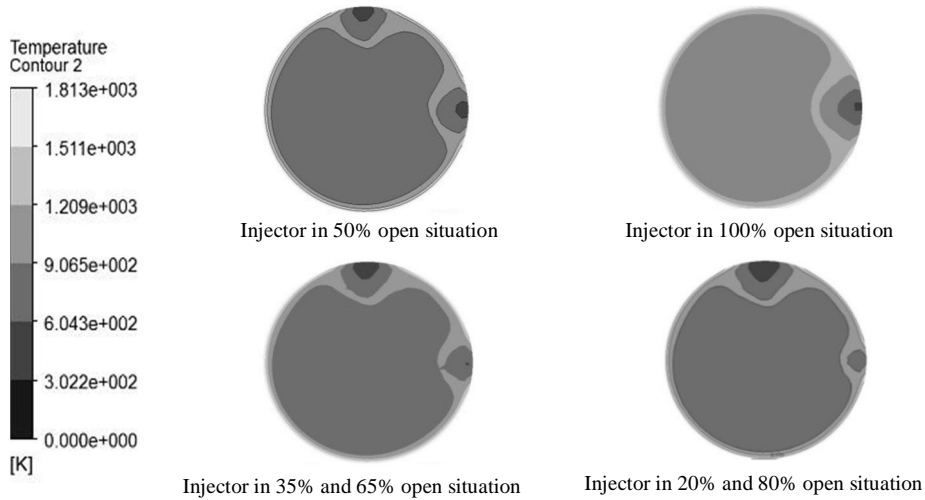


Fig. 13 The temperature distribution on output nozzle section for four case injections

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

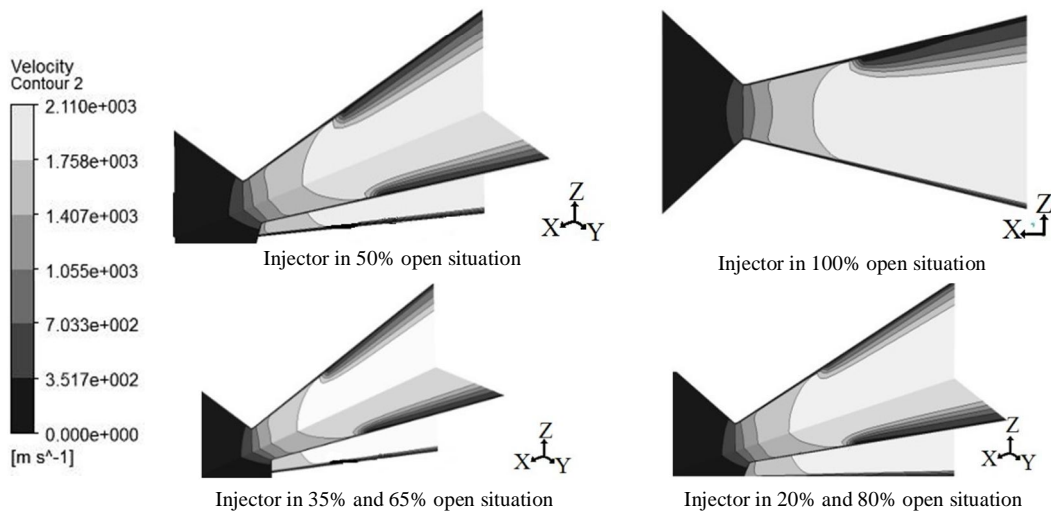


Fig. 14 The speed contours in injection pages in four cases selected

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.

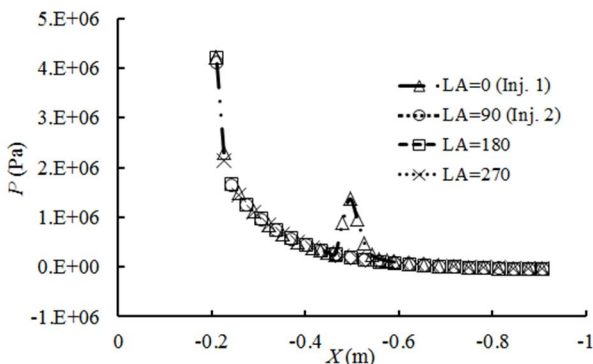


Fig. 16 The static pressure distribution on the divergent nozzle wall, while that injector 100% open

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

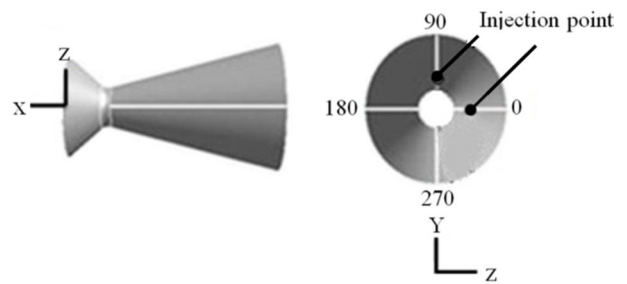


Fig. 15 The study paths on surface of divergent nozzle

شکل 15 مسیره های 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		
دبی جریان اصلی نازل (kg/s)		134.92		
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 اما 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

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 شکل‌گیری پدیده شوک، فشار بالا رفته و این تغییر فشار به علت پاشش یکسان انژکتورها به یک‌میزان 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 کاهش 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.

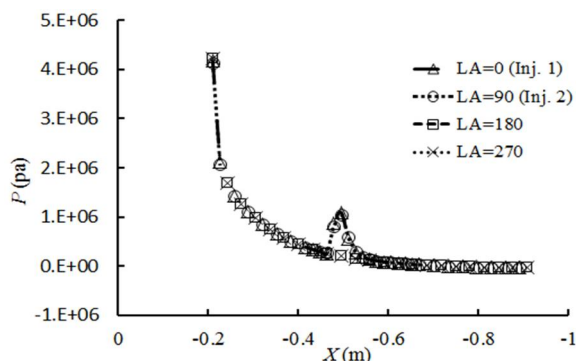


Fig. 17 The static pressure distribution on the divergent nozzle wall, while those two injectors 50% open

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

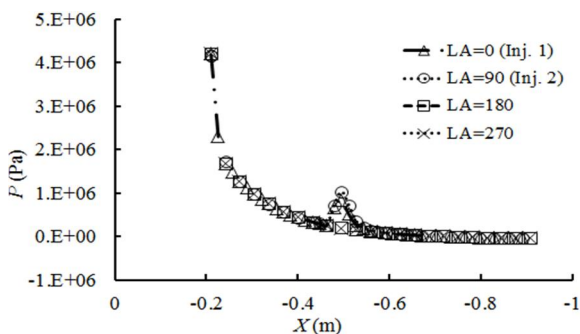
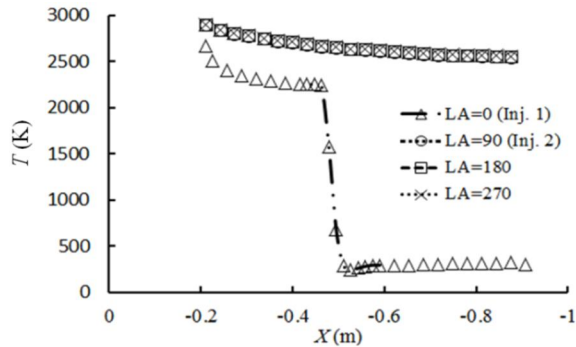


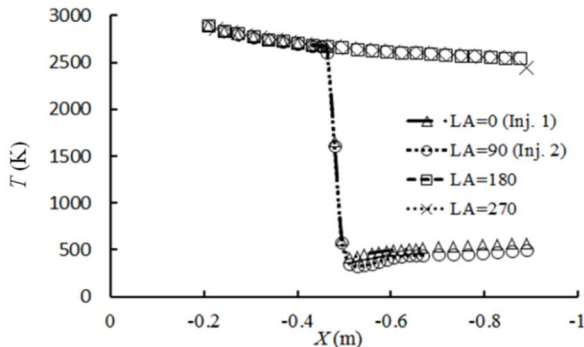
Fig. 18 The static pressure distribution on the divergent nozzle wall, while that one injector 65% and another one 35% open

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

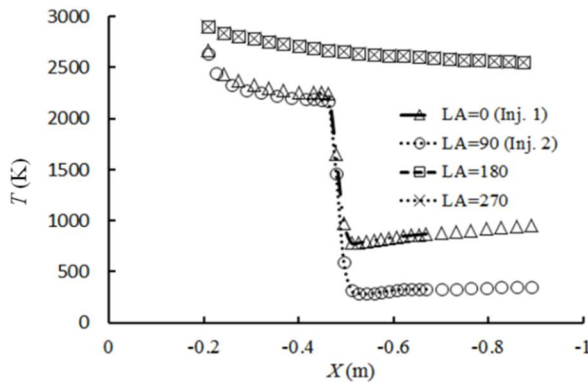
شد یال‌های مورد بررسی از گلوگاه نازل تا مقطع خروجی نازل در نظر گرفته شده است و دمای نازل در گلوگاه نسبت به دهانه ورودی نازل 100 درجه کلون کاهش یافته است. در موقعیت پاشش، دما بر روی یال‌ها تقریباً برابر 2000 درجه کلون می‌باشد که با دمای به دست آمده در جدول 1 در نقطه نزدیک پاشش اختلافی 500 درجه‌ای دارد. 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



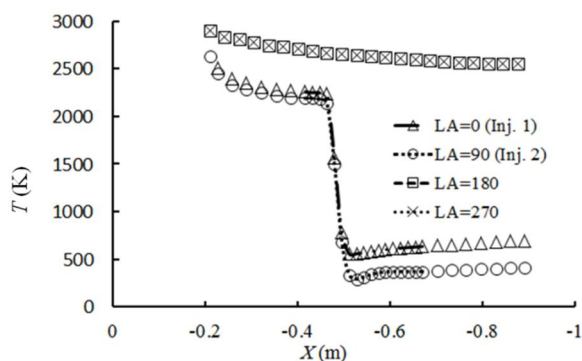
a: Injector in 100% open situation



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 می‌باشد و محور عمودی نشان‌دهنده 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 یال‌های صفر و 90 درجه، در این یال‌ها چگالی به شدت افزایش می‌یابد 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% باز تقریباً دو برابر افزایش چگالی در پاشش 50% باز می‌باشد. می‌توان 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 یال‌های نازل هم‌مقدار می‌شود. بالاترین افزایش چگالی مربوط به پاشش 100% می‌باشد که در حدود 72 کیلوگرم بر مترمکعب است. جریان اصلی عبوری از نازل بدون پاشش سیال جانبی، به‌طور جداگانه تحلیل گردید. بطور کلی نتایج به دست آمده در شکل‌های 16 تا 21 و مقایسه با جریان نازل بدون پاشش ثانویه، نشانگر آن است که با توجه به انتخاب مناسب پارامترهای پاشش، جریان روی دیواره‌ی روبروی نقطه پاشش متأثر از جت جانبی نمی‌باشد. این ویژگی مادام که شرایط پاشش به مقدار بحرانی و زاویه انحراف بردار تراست کمتر از مقدار بیشینه است، برقرار می‌باشد و در پاشش بحرانی، جریان ثانویه روی دیواره‌ی مقابل و سپس تمام جریان نازل اثری مخرب می‌گذارد.

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 می‌باشد. خصوصیات گازهای حاصل از احتراق موجود نمی‌باشد، 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 می‌دهد. پارامتر نسبت دبی پاشش به دبی کل و F_p/F_m نسبت نیروی جانبی به نیروی تراست محوری می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی در دو نقطه 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 می‌باشد و میزان اختلاف نتایج در شبیه‌سازی اول و دوم تقریباً 11% شده است.

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

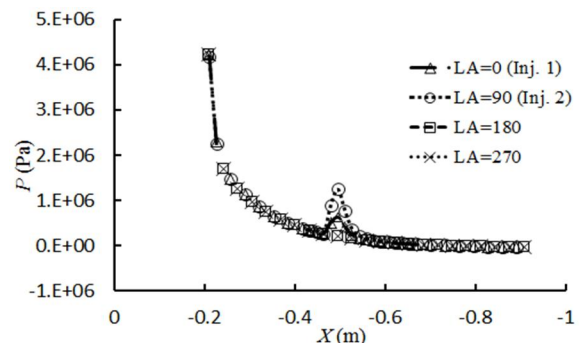


Fig. 19 The static pressure distribution on the divergent nozzle wall, while that one injector 20% and another one 80% open

شکل 19 نمودار توزیع فشار استاتیک روی دیواره نازل واگرا در حالت انژکتور 20% و 80% باز

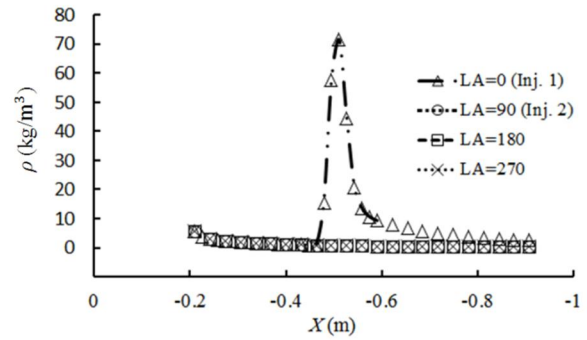
جدول 6 شرایط مرزی و هندسی نمونه آزمایشگاهی

پارامتر	مقدار	واحد
دبی جریان اصلی	9.28	کیلوگرم بر ثانیه
دمای ورودی جریان اصلی	2400	درجه کلوین
فشار استاتیک ورودی جریان اصلی	106	اتمسفر
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	-

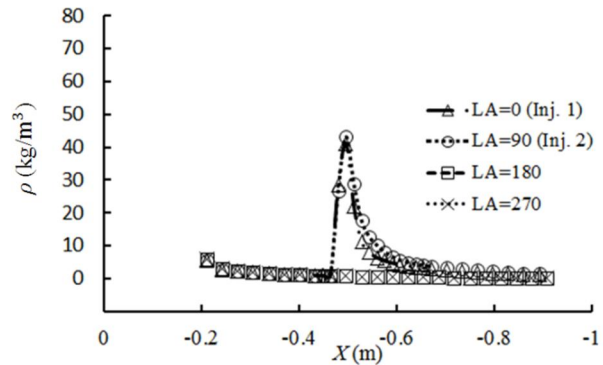
5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

پارامترهای طراحی سیستم LITVC شامل مواردی همچون حجم موشک و نازل مورد استفاده و شرایط موتور موشک می‌باشد 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 می‌باشد. 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 مقارن‌سازی 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 نگه‌داشتن پارامترهایی چون فشار مخزن که برابر 42.2 بار می‌باشد 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 می‌باشد 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 میلی‌متر 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 میلی‌متر 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 ورودی‌های سیستم کمتر می‌باشد.

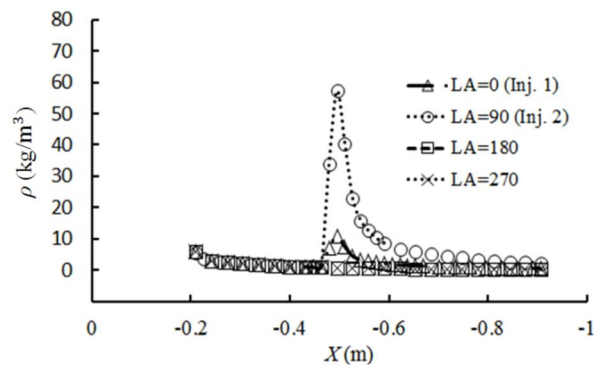
میزان ابعاد مجاری ارتباطی بین اجزا به صورتی در نظر گرفته شده که از



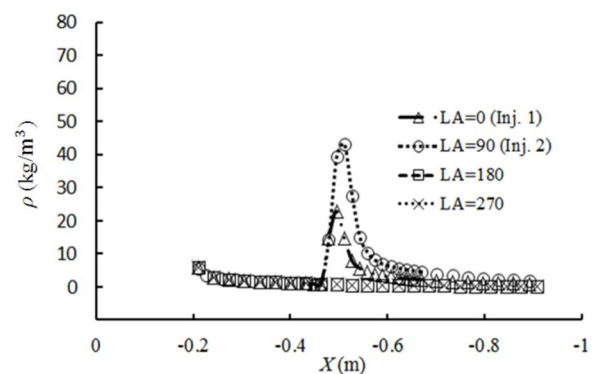
a: Injector in 100% open situation



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 داده‌های دقیق ورودی مسئله، نتایج تا حدودی با هم اختلاف دارند. با این وجود مقدار خطا قابل قبول می‌باشد.

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)

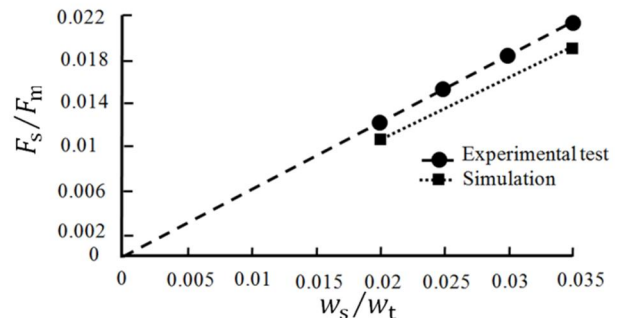


Fig. 22 The diagram of comparing between simulation and experimental results [1]

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 کاهش شدید گردیده و به تدریج کمی افزایش می یابد، ولی تا انتهای نازل با دمای دیگر یال های