

## تحلیل پارامترهای هندسی انژکتور در پاشش جانبی برای کنترل بردار تراست و طراحی کمربند پاشش دور یک نازل معین

مهدی تحریری نوری<sup>۱</sup>، محمدرضا حیدری<sup>۲\*</sup>، علیرضا پورامیر<sup>۳</sup>

۱ و ۳- کارشناس ارشد، ۲- استاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند

(تاریخ وصول: ۹۸/۱۱/۰۷، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۱/۲۵)

### چکیده

این مقاله به طراحی و تحلیل انژکتور مناسب برای یک سامانه LITVC پرداخته است. هدف از به کارگیری سامانه LITVC در سامانه‌های پروازی، کنترل و انحراف بردار تراست به روش پاشش ثانویه سیال است. بدین منظور، پس از مطالعه و دسته‌بندی انواع انژکتورها بر اساس ساختمان هندسی و شرایط عملکردی، نوع انژکتور گریز از مرکز تک پایه، به دلایل یکنواختی پاشش، قابلیت انتقال دبی‌های بالاتر و ابعاد هندسی به نسبت کوچک‌تر، مبنای طراحی قرار گرفت. در این فرآیند ضمن تعریف سه گروه پارامتر هندسی بدون بعد، طراحی بر مبنای محاسبات روابط مهندسی و حل عددی در نرم‌افزار فلوئنت صورت پذیرفت. در این مرحله انژکتوری که مناسب‌ترین سرعت خروجی و کمترین میزان افت فشار را داشت، به‌عنوان محصول نهایی طراحی برگزیده شد. در نهایت با مطالعه ۳ نوع چیدمان مختلف انژکتور و محاسبه میزان انحراف بردار تراست هر چیدمان، ضمن اعتبارسنجی با نتایج تحقیقات پیشین، بهترین کمربند پاشش شناسایی گردیده است.

**واژه‌های کلیدی:** طراحی هندسه انژکتور، شبیه‌سازی عددی جریان، کنترل بردار تراست، پاشش ثانویه سیال، کمربند پاشش.

## Injector Geometrical Parameters Analysis in Side Injection for Thrust Vector Control and Injection Belt Design around a Nozzle

M. Tahriri Noori, M. R. Heidari\*, A. R. Pooramir

Islamic Azad University, Parand branch.

(Received: 01/27/2020, Accepted: 04/13/2020)

### Abstract

This paper focuses on the design and analysis of an injector suitable for a liquid injection thrust vector control (LITVC) system. The LITVC system is used in flight systems to control and divert the thrust vector using the secondary fluid spraying method. For this purpose, various types of injectors were studied and categorized based on the geometry and operating conditions. The centrifugal single-base injector was selected as the design basis due to its uniform spraying, the ability to transfer higher flow rates, and relatively smaller geometric dimensions. In this process, in addition to defining three groups of non-dimensional geometric parameters, design was made based on engineering calculations and numerical solutions in FLUENT. The injector with proper outlet speed and the lowest pressure drop was selected as the final product of the design. Then, three different types of configurations were studied and the amount of thrust vector deflection created by each configuration was calculated. Findings were validated using the results reported by the previous researches, and finally, the best spray belt was introduced.

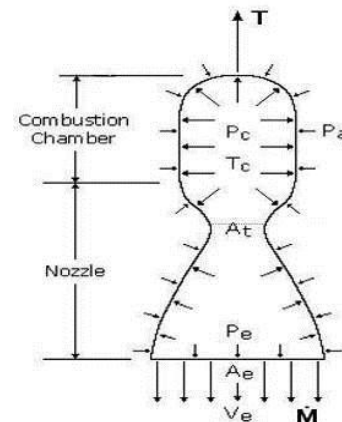
**Keyword:** Injector Design, Geometrical Parameters, Numerical Simulation of Flow, Liquid Injection Thrust Vector Control, Injection Belt.

## ۱- مقدمه

در سامانه‌های موتورهای پروازی یا جت، نیروی حاصل از خروج گازهای در حال احتراق، که موجب حرکت موشک به جلو می‌گردد، تراست نامیده می‌شود. شکل (۱) نمایی از مجموعه نیروهای اعمالی به مجموعه موتور را نشان می‌دهد. نیروی تراست از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱]:

$$T = \dot{M} V_e + (p_e - p_a) A_e \quad (1)$$

که در آن،  $T$  نیروی تراست،  $p_e$  فشار محصولات احتراق،  $p_a$  فشار محیط،  $A_e$  مساحت سطح مقطع عرضی خروجی نازل،  $V_e$  سرعت خروج محصولات احتراق،  $\dot{M}$  دبی جرمی پیشران،  $\dot{M} V_e$  تراست مومنتوم و  $(p_e - p_a) A_e$  تراست فشاری موتور است.



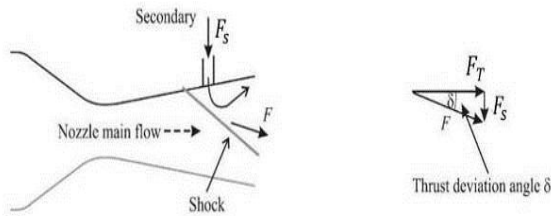
شکل ۱ - نیروها و فشارهای وارد بر نازل پرنده.

در فرآیند کنترل بردار تراست با پاشش ثانویه سیال<sup>۱</sup>، جت تزریق شده مانند یک سد بر سر راه جریان سیال مافوق صوت در داخل نازل قرار می‌گیرد و این امر منجر به ایجاد شوکی می‌گردد که عامل اصلی از بین رفتن تقارن در توزیع فشار و در نهایت تشکیل نیروی جانبی تراست می‌شود [۲]. از آنجائی که توزیع نامتقارن فشار در بخش واگرای نازل شکل می‌گیرد، بنابراین در اثر ایجاد مقدار کمی نیروی جانبی می‌توان انحراف قابل توجهی در بردار تراست ایجاد کرد [۳ و ۴].

در طراحی اجزای یک سامانه LITVC، انژکتورهای پاشش سیال از اهمیت به سزایی برخوردارند و طراحی بهینه و مناسب انژکتورها، تأثیر فراوانی بر عملکرد سامانه پروازی خواهد داشت. این تحقیق به دنبال تعیین پارامترهای هندسی و طراحی انژکتوری است که بتواند نیروی تراست اصلی را به مقدار قابل قبول و تحت شرایط معین، منحرف نماید. مقدار نسبی این انحراف از مراجع و تحقیقات قبل معین گردیده است [۵]. در واقع چنانچه زاویه  $\delta$  به‌عنوان زاویه انحراف تراست اصلی معرفی گردد، نسبتی خواهد بود از نیروی جانبی ایجاددی در اثر تزریق جت جانبی ( $F_s$ ) به تراست اصلی ( $F_T$ )، که در رابطه (۲) چگونگی

محاسبه آن بیان شده است. شکل (۲) تعبیر هندسی این فرآیند را نمایش می‌دهد.

$$\tan \delta = \frac{F_s}{F_T} \quad (2)$$



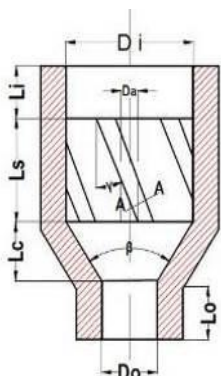
شکل ۲ - زاویه  $\delta$  به‌عنوان زاویه انحراف تراست اصلی.

با وجود تحقیقات انجام شده پیرامون طراحی پارامترهای آیرودینامیکی پاشش از انژکتورها، مسئله طراحی هندسی انژکتورهای سامانه‌های LITVC یکی از موضوعاتی است که در مبحث کنترل بردار تراست، به ویژه در داخل کشور، به آن پرداخته نشده است.

نادا و هاشم [۶] با هدف بهینه‌سازی و افزایش راندمان، نظریه طراحی انژکتورهای گریز از مرکز را ارائه نموده و به طراحی و سپس ساخت این انژکتورها پرداختند. سه نمونه ساخته شده از این انژکتورها با اعمال تغییرات در پارامترهای هندسی، مورد آزمایش قرار گرفت و در نهایت نتایج تجربی به‌صورت جدول‌هایی تدوین و ارائه گردید. بچ و همکارانش [۷] در خصوص بهبود و افزایش راندمان سامانه پاشش، به انجام محاسبات تئوری انژکتور پرداخته و یک هندسه بهبود یافته برای انژکتور را ارائه نمودند. تانی و همکاران [۸] به مطالعه تأثیر هندسه انژکتورهای برخوردی با مؤلفه‌های غیر همنام در موشک‌های سوخت مایع تحت فشارهای بحرانی پرداختند. آن‌ها ضمن تعیین پارامترهای طراحی این انژکتور، مانند قطر دهانه پاشش، زاویه مخروط پاشش و ضخامت دیواره نازل پاشش، نمونه‌های ساخته شده را آزمایش و نتایج حاصل را ارائه نمودند. کاظمی و مظاهری [۹] به بررسی تجربی تأثیر پارامترهای هندسی انژکتورهای پیچشی پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش PDA تأثیر پارامترهای هندسی یک انژکتور پیچشی بر روی اندازه و سرعت قطرات اسپری را مورد مطالعه قرار دادند. اُمی و همکارانش [۱۰] به طراحی، ساخت و آزمایش یک انژکتور گریز از مرکز دو پایه جهت کاربرد در موشک‌های سوخت مایع پرداختند. آن‌ها مراحل طراحی یک انژکتور گریز از مرکز را به دقت بیان نموده و با رعایت مراحل چندگانه، به طراحی، مدل‌سازی، ساخت و آزمایش چند نمونه انژکتور گریز از مرکز با هندسه متفاوت پرداختند. سپس انژکتورها مورد آزمایش عملی قرار گرفتند. نتایج حاصل از آزمون عملی با نتایج محاسبات تئوری مقایسه گردید و مشاهده شد که نتایج حاصل از آزمایش عملی، با نتایج تئوری همخوانی دارد. حیدری و پورامیر [۱۱] در زمینه شبیه‌سازی کنترل بردار تراست به روش پاشش تک انژکتوره سیال مایع به تحقیق و بررسی پرداخته و نتایجی را نیز ارائه نمودند. در

## ۱-۲- انتخاب انژکتور

با توجه به شرایط عملکردی انژکتورها در سامانه‌های LITVC، که عبور دبی‌های بالا از مهم‌ترین ویژگی‌های این سامانه‌هاست، انژکتور گریز از مرکز برای این سامانه‌ها انتخاب می‌شود. سپس با توجه به تزریق جت با یک نوع سیال، نوع تک‌پایه از این انژکتورها به کارگیری خواهد شد. تصویر مربوط به هندسه یک انژکتور گریز از مرکز تک‌پایه در شکل (۳) آورده شده است.



شکل ۳- نمایی از هندسه انژکتور گریز از مرکز تک‌پایه.

## ۲-۲- تعیین پارامترهای هندسی بدون بعد

از دیدگاه هندسه انژکتور، مقدار انحراف بردار تراست تابعی است که می‌تواند بر اساس سه گروه متغیرهای هندسی بدون بعد، به صورت زیر تعریف گردد:

$$\delta = f(\bar{L}_o, \bar{L}_c, \bar{L}_s) \quad (۳)$$

$$\bar{L}_o = \frac{L_o}{D_o} \quad (۴)$$

$$\bar{L}_c = \frac{L_c}{D_o} \quad (۵)$$

$$\bar{L}_s = \frac{L_s}{D_i} \quad (۶)$$

کلیه پارامترهای هندسی فوق، روی تصویر شماتیک هندسه انژکتور در شکل (۳) معرفی گردیده و پارامترهای اصلی مورد مطالعه در این تحقیق هستند.

## ۳-۲- طراحی انژکتور بر مبنای قواعد و روابط مهندسی

معادلات حاکم بر تئوری طراحی انژکتورهای گریز از مرکز، بر اساس قوانین اصل بقای جرم، اصل بقای اندازه حرکت زاویه‌ای، اصل بقای انرژی (معادله برنولی) و اصل حداکثر دبی یا حداقل انرژی استوار است. با تعمیم قوانین فوق و روابط ریاضی حاکم بر آن‌ها می‌توان به تعیین و محاسبه پارامترهای هندسی اولیه انژکتور، از رویکردی دیگر پرداخت. در واقع روابط فوق، ضمن تلفیق با روابط تجربی آزمایشگاهی، معادلاتی را در اختیار قرار می‌دهند که منجر به محاسبه کمیت‌های ابعادی در انژکتور می‌شود [۶].

این شبیه‌سازی، جریان آشفته همراه با پاشش ذرات مایع مدل شده است. برای این منظور معادلات مومنتوم، انرژی، آشفستگی و معادلات مربوط به فاز گسسته مدل شده است. به منظور مدل‌سازی آشفستگی جریان از مدل  $k-\epsilon$  استفاده گردید. همچنین در صفحه‌ای که پاشش انجام می‌شود توسط نرم‌افزار فلونت سلول‌ها برای بهینه‌سازی، ریزتر و تنظیم شده‌اند تا از خطای محاسبات بکاهند. حسینعلی‌پور و همکارانش [۱۲] به طراحی، شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی یک انژکتور گریز از مرکز با ورودی مماسی پرداختند. آن‌ها برای طراحی یک انژکتور گریز از مرکز تک‌پایه معادلات حاکم را دسته‌بندی نمودند. سپس با بیان فاکتورهای هندسی طراحی انژکتور و دسته‌بندی معلومات و مجهولات طراحی، چارچوب کار را مشخص نموده و طراحی هندسی را انجام دادند.

لی و همکارانش [۱۳] کنترل بردار تراست به وسیله پاشش مایع پراکسید هیدروژن در راکت‌های ترکیبی را بررسی نمودند. آن‌ها اثرات پارامترهای فشار محفظه، موقعیت پاشش و دبی جریان پاشش پراکسید هیدروژن با خلوص ۹۵ درصد را روی عملکرد سامانه LITVC مطالعه کرده و نشان دادند که در موقعیت پاشش بهینه ۴۷٪، هم‌زمان با افزایش فشار محفظه از ۲۰ بار به ۴۰ بار، ضربه مخصوص جانبی بیش از دو برابر می‌شود. همچنین گسترش شعاعی پاشش، ناشی از افزایش دبی جریان جانبی، موجب تخریب راندمان LITVC خواهد شد.

نوامان و همکارانش [۱۴] اثرات موقعیت پاشش، زاویه پاشش و نیم‌زاویه واگرایی نازل را از طریق شبیه‌سازی عددی میدان جریان نازل در سامانه کنترل بردار تراست با پاشش ثانویه، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تغییرات این پارامترهای عملکردی، با فرض ثابت ماندن دبی جرمی پاشش در سامانه SITVC، نشانگر تأثیرپذیری بیشتر ساختار میدان جریان از موقعیت پاشش و نیم‌زاویه نازل نسبت به زاویه پاشش جریان جانبی است.

در این تحلیل عددی، معادلات ناویراستوکس به صورت تراکم‌ناپذیر، پایا، سه‌بعدی و تقارن محوری با صرف نظر از معادله انرژی در نظر گرفته شده و حل به کمک نرم‌افزار Ansys Fluent 13 انجام پذیرفته است. در ادامه به معرفی روش تحقیق حاضر و ارائه نتایج آن پرداخته می‌شود.

## ۲- روش طراحی انژکتور و کمر بند پاشش

این طراحی، بر پایه دو روش محاسبات مهندسی (بر اساس روابط تلفیقی) و شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار فلونت استوار است. بدین ترتیب که ابتدا به کمک روابط تلفیقی تئوری و بر اساس فرضیات معلوم، تعدادی از پارامترهای هندسی یک انژکتور محاسبه می‌شود. سپس در شبیه‌سازی و حل عددی، سایر ابعاد هندسی باقی مانده از انژکتور مورد آزمون و محاسبه قرار گرفته و تأثیر مقادیر مجاز آن‌ها بر عملکرد نهایی انژکتور مورد سنجش قرار می‌گیرد [۶، ۹، ۱۰ و ۱۲].

۹- تعداد شیارها ( $n$ )، معمولاً ۳ عدد در نظر گرفته می‌شود. مقدار بیشینه برای زاویه شیارها، ( $\gamma$ )، ۳۰ درجه است.

۱۰- محاسبه قطر محفظه چرخش ( $D_i$ ) از روابط (۱۴) و (۱۵). بدین منظور، ابتدا مقدار  $R_z$  به‌عنوان فاصله محور انژکتور تا مرکز شیار را به‌دست آورده و سپس قطر محفظه چرخش محاسبه می‌شود.

$$A = \frac{R_z R_i}{n(a/2)^2} \quad (14)$$

$$R_i = R_z + \frac{a}{2} \quad (15)$$

۱۱- محاسبه طول نازل ( $L_o$ )، که بر اساس نسبت  $\frac{L_o}{D_o}$  تعیین می‌شود. برای این نسبت، مقداری بین ۰/۲۵ تا ۱ توصیه می‌گردد [۶].

۱۲- زاویه پخ نازل ( $\beta$ )، که بر اساس توصیه، مقداری بین ۶۰ تا ۱۲۰ درجه را می‌توان بنا به نظر طراح، در نظر گرفت.

۱۳- محاسبه طول کلی انژکتور ( $L_T$ ) از روابط (۱۲) و (۱۳)، که بر اساس توصیه، بهتر است از ۱/۵ برابر قطر داخلی آن، کمتر نباشد.

$$L_T = L_i + L_s \quad (16)$$

$$L_T \geq 1.5 D_i \quad (17)$$

سیال پاشش، فریون ۱۲ با دبی حدود ۷٪ دبی کل نازل و به مقدار ۰/۵۵۵۱ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است [۶]. در نهایت پس از چند مرحله تکرار محاسبات (به‌منظور کاهش اختلاف در مرحله ۵)، نتایج اولیه برای حل عددی به‌دست می‌آید.

## ۴-۲- طراحی انژکتور بر مبنای شبیه‌سازی و حل عددی

هدف از تحلیل عددی انژکتور، محاسبه دقیق پارامترهای اصلی  $L_c$ ،  $L_o$  و  $L_s$  بر مبنای روابطی است که قبلاً اشاره شد. بدین منظور، در هر مرتبه مدل‌سازی انژکتور، یکی از پارامترهای  $\bar{L}_o$ ،  $\bar{L}_c$  و  $\bar{L}_s$  تغییر یافته و دو پارامتر دیگر ثابت فرض می‌شوند تا مقدار بهینه مربوط به آن متغیر، مشخص گردد. در این روش طراحی، پس از تعیین پارامترهای سرعت و فشار در هر انژکتور، انژکتور با کمترین افت فشار و بهترین سرعت خروجی شناخته و انتخاب می‌شود. سپس متغیرهای بعدی مورد سنجش قرار گرفته تا در نهایت بهترین مقادیر به‌عنوان پارامترهای طراحی انژکتور انتخاب شده و هندسه و ساختمان انژکتور بر این مبنای قرار گیرد.

## ۵-۲- فرضیات مسئله در طراحی کمربند پاشش

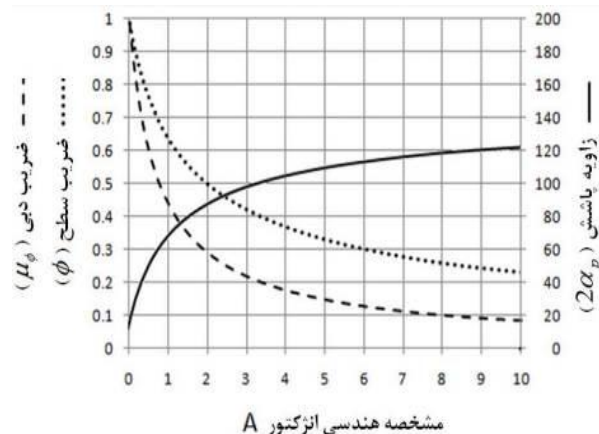
جدول (۱) شرایط مرزی نازل و شکل (۵) هندسه دقیق نازل منتخب برای طراحی کمربند پاشش را نشان می‌دهد.

## ۶-۲- تابع توزیع دبی جت جانبی

مدل پیشنهادی توزیع دبی انژکتورهای هر چیدمان، مدل  $\pi$  برابری دبی پاشش است. در این مدل، توزیع دبی‌های پاشش بدین صورت است که دبی هر انژکتور،  $\pi$  برابر دبی انژکتور بعدی همسایه است. هنگامی که  $\pi=1$  است، مقدار دبی پاشش همه انژکتورها با هم برابر بوده و مجموع

مراحل محاسبه پارامترهای ابعادی به ترتیب به شرح زیر است:

۱- انتخاب مقدار زاویه پاشش از روی نمودار شکل (۴). در نتیجه این انتخاب، مقادیر مربوط به مشخصه هندسی و ضریب دبی و در نهایت دبی جریان پاشش  $m$ ، به‌دست می‌آیند.



شکل ۴- ضریب دبی ( $\mu_0$ )، ضریب سطح ( $\phi$ ) و زاویه میانگین چتر پاشش ( $2\alpha_p$ ) بر حسب مشخصه هندسی انژکتور [۶].

۲- محاسبه قطر اریفیس خروجی از رابطه (۷).

$$m = C_d A_o \sqrt{2 \rho_L \Delta p_L} \quad (7)$$

با انتخاب مقدار ۲ تا ۱۵ بار برای  $\Delta p_L$  و معلوم بودن مقادیر چگالی و

دبی مایع پاشش و نیز انتخاب مقدار مناسب برای ضریب پسی انژکتور

$C_d$ ، مساحت  $A_o$  و در نهایت قطر اریفیس  $d_o$  از رابطه بالا به‌دست می‌آید.

۳- محاسبه عدد رینولدز از رابطه (۸).  $\mu_L$  لزجت مایع پاشش و  $\Delta p$  اختلاف فشار دو سر انژکتور است.

$$Re = \frac{\rho_L d_o \sqrt{2 \Delta p / \rho_L}}{\mu_L} \quad (8)$$

۴- محاسبه ضریب اصطکاک ( $\lambda$ ) از رابطه (۹).

$$\log \lambda = \frac{25.8}{(\log Re)^{2.58}} - 2 \quad (9)$$

۵- محاسبه مشخصه هندسی واقعی ( $A_s$ ) از رابطه (۱۰). اگر اختلاف

این مقدار با  $A$ ، کمتر از ۵ درصد باشد، انتخاب فاکتورها قابل قبول است، در غیر این صورت می‌بایست در طراحی و انتخاب فاکتورهای

اولیه تجدید نظر نمود.  $\beta$  مقدار معلوم زاویه پخ نازل است.

$$A_s = \frac{A}{1 + \frac{\lambda}{2} \left( \frac{\beta^2}{n \sin \beta} - A \right)} \quad (10)$$

۶- محاسبه قطر اریفیس محوری از رابطه (۱۱).

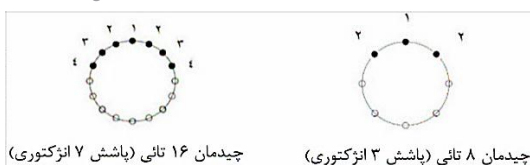
$$d_s = d_o (0.676 - 24 d_o)^{0.5} \quad (11)$$

۷- محاسبه سطح مقطع شیارها، که ضریبی از سطح مقطع اریفیس محوری است و از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$A_s = 4.3 A_o \quad (12)$$

۸- محاسبه ضلع شیار ماریچ با مقطع مربع از رابطه (۱۳).

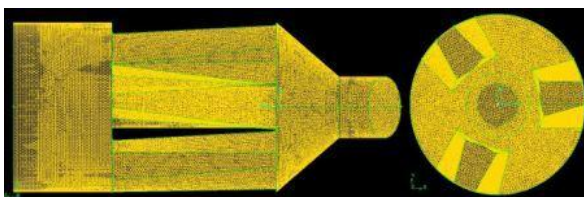
$$a = \left( \frac{A_s}{n \cos \gamma} \right)^{0.5} \quad (13)$$



شکل ۶- نمایش قرارگیری انژکتورهای مؤثر در پاشش، برای دو چیدمان ۸ و ۱۶ انژکتوری.

### ۷-۲- شبکه‌بندی مسئله و استقلال حل از شبکه

مدل‌سازی و مش‌بندی انژکتورهای مورد بحث، در نرم‌افزار گمبیت انجام پذیرفته است. با توجه به اهمیت مقادیر مربوط به فشار و سرعت در نزدیکی دیوارها و به منظور افزایش دقت محاسبات مذکور، از یک شبکه با ساختار، در جهت طولی و در لایه‌های مجاور بدنه استفاده شده است. این شبکه در نزدیکی دیواره‌ها، بسیار فشرده‌تر از نواحی مرکزی و داخلی انژکتور است. در واقع در نزدیکی دیواره‌ها، شبکه خاص لایه مرزی ایجاد شده است. المان به‌کارگیری شده در سطوح از نوع Quad، و نوع به‌کارگیری شده در اجسام، از نوع Tet/Hybrid است. شکل (۷) دو نما از شبکه بندی نهایی مسئله حاضر را نمایش می‌دهد.



شکل ۷- نمایی از شبکه‌بندی هندسه انژکتور.

با توجه به شکل (۸)، به منظور دستیابی به استقلال حل از شبکه در نظر گرفته شده، مدل انژکتور با سه حجم متفاوت سلول، به مقادیر ۱۸۲۷۸۶، ۵۷۱۳۴۱ و ۱۱۴۲۵۵۳ سلول شبکه‌بندی و حل گردید. در طی این سه حل، پارامتر ثابت سرعت خروجی ( $V_e$ ) اندازه‌گیری و مقادیر آن با یکدیگر مقایسه شد. از آنجایی که نتایج دو حل دوم و سوم اختلاف ناچیزی در حدود ۰.۶٪ دارند، بنابراین شبکه‌بندی با تعداد سلول‌های در حدود ۵۴۰۰۰۰ عدد (با تعداد گره ۱۰۳۴۱۷ عدد) به‌عنوان تعداد نهایی سلول‌ها، به‌منظور حل عددی انژکتورها، انتخاب گردیده است. جدول (۲) اطلاعات کامل‌تری در این خصوص در اختیار قرار می‌دهد. در این شبیه‌سازی از مدل آشفتگی استاندارد دو معادله‌ای K-ε که از مدل‌های ساده، سریع، پر دقت، کاربردی و پر استفاده در فلوننت است، استفاده شده است [۵].

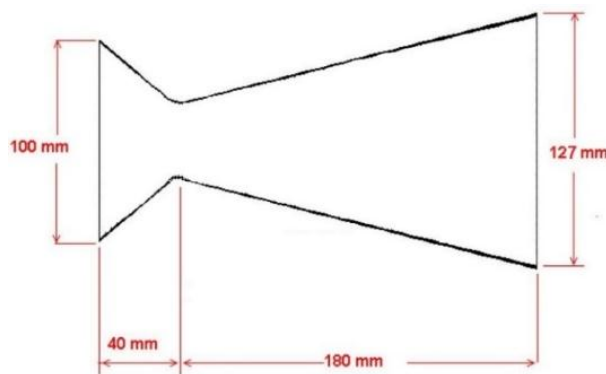
جدول ۲- نتایج سرعت خروجی سه انژکتور با تعداد سلول‌های مختلف.

ردیف	تعداد سلول	تعداد گره	سرعت خروجی (m/s)
۱	۱۸۲۷۸۶	۳۵۹۰۳	۵/۹
۲	۵۷۱۳۴۱	۱۰۸۴۲۴	۷/۵
۳	۱۱۴۲۵۵۳	۲۱۰۸۶۰	۸

دبی آن‌ها برابر با دبی کل پاشش مورد نظر است. هنگامی که  $n=2$  است، دبی انژکتور اول دو برابر دبی انژکتور دوم و دبی انژکتور دوم دو برابر دبی انژکتور سوم را دارا است. آنچه مسلم است، مجموع دبی انژکتورها باید برابر با دبی کل پاشش باشد. برای تحقیق حاضر توزیع دبی با  $n=3$  انتخاب گردیده است.

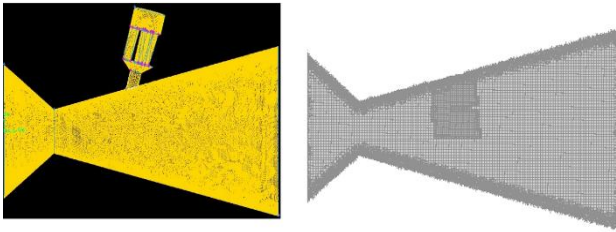
جدول ۱- مقادیر مربوط به شرایط مرزی نازل.

ردیف	پارامتر	مقدار	واحد
۱	طول بخش همگرا	۰/۰۴	متر
۲	زاویه بخش همگرا	۴۰	درجه
۳	طول بخش واگرا	۰/۱۸	متر
۴	زاویه بخش واگرا	۱۴	درجه
۵	مساحت سطح ورودی	۰/۰۰۷۸۴۶	مترمربع
۶	مساحت سطح خروجی	۰/۰۱۲۶۵۵	مترمربع
۷	نسبت سطح خروجی به گلوگاه	۱۰/۶	-
۸	دمای محیط	۳۰۰	کلوین
۹	فشار محیط	۱	اتمسفر
۱۰	دبی کل ورودی	۵/۹	کیلوگرم بر ثانیه
۱۱	دبی پاشش	۰/۵۵۵۱	کیلوگرم بر ثانیه
۱۳	دمای ورودی	۲۴۰۰	کلوین

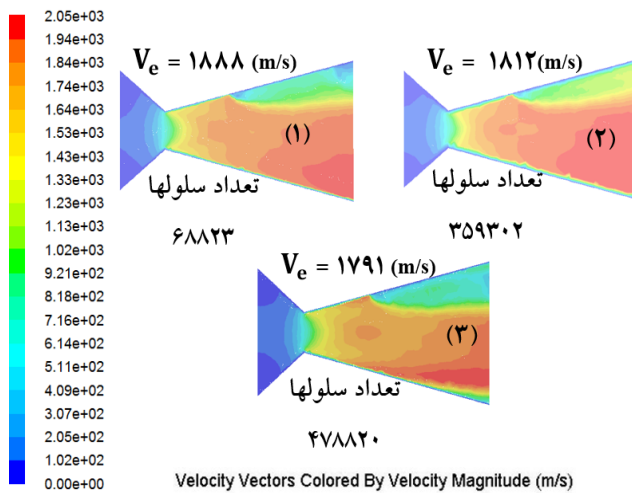


شکل ۵- نمایی از هندسه نازل جهت طراحی کمر بند پاشش.

نکته دیگری که باید در زمینه نحوه پاشش بیان کرد آن است که پاشش به‌طور منطقی فقط در نیمی از محیط مقطع نازل انجام می‌پذیرد و در نیمه مقابل، دبی انژکتورها صفر است؛ چرا که برای ایجاد گشتاور مورد نظر روی جسم پرنده، پاشش باید از سمت انژکتورهای مورد نظر انجام گیرد. از طرف دیگر دو انژکتوری که در دو سر نیمه مقطع قرار دارند نیز باید به دلیل بی اثر بودن و عملکرد کاملاً متضاد با یکدیگر، بسته باشند. بنابر این در نهایت پاشش از تعداد نصف منهای یک عدد از انژکتورها انجام می‌پذیرد. شکل (۶) چگونگی قرارگیری انژکتورهای مؤثر در پاشش، برای دو چیدمان هشت و شانزده انژکتوری را نشان می‌دهد.



شکل ۹- مدل سازی و شبکه بندی نازل و تراکم سلول های شبکه در نزدیکی دیواره ها و مجاور صفحه پاشش.



شکل ۱۰- نمایش کانتر سرعت درون نازل با سه حجم مختلف سلول.

جدول ۳- نمایش نتایج سرعت خروجی برای تعداد سلول های مختلف.

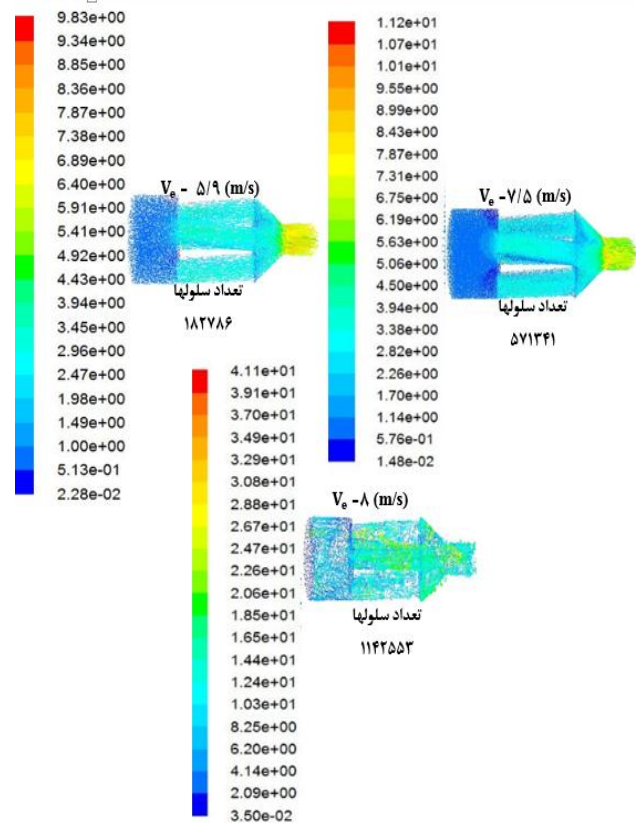
ردیف	تعداد سلول	تعداد گره	سرعت خروجی (m/s)
۱	۶۸۸۲۳	۱۳۸۲۵	۱۸۸۸
۲	۳۵۹۳۰۲	۷۱۱۴۱	۱۸۱۲
۳	۴۷۸۸۲۰	۱۳۶۰۱۹	۱۷۹۱

### ۳- بیان نتایج طراحی انژکتور و کمربند پاشش

در این بخش نتایج طراحی انژکتور، نتایج طراحی کمربند پاشش و محاسبه بردار تراست، به همراه اعتبارسنجی و تحلیل نتایج به دست آمده ارائه می شود.

#### ۳-۱- نتایج طراحی انژکتور

پس از مدل سازی و حل معادلات فاز گسسته جریان (معادلات مومنتوم، انرژی و آشفستگی) و ضمن بررسی همگرایی نتایج حل عددی و محاسبه و کسب نتایج طراحی، به مطالعه و تحلیل فشار و سرعت انژکتور، برای سه دسته پارامتر هندسی بدون بعد  $\bar{L}_O$ ،  $\bar{L}_C$  و  $\bar{L}_S$  پرداخته می شود. لازم به ذکر است که روند حل عددی در فلوننت بدین ترتیب است که ابتدا پارامتر  $\bar{L}_O$ ، سپس  $\bar{L}_C$  و در نهایت  $\bar{L}_S$  مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرد.



شکل ۸- کانترهای سرعت سه انژکتور با سه حجم مختلف سلول.

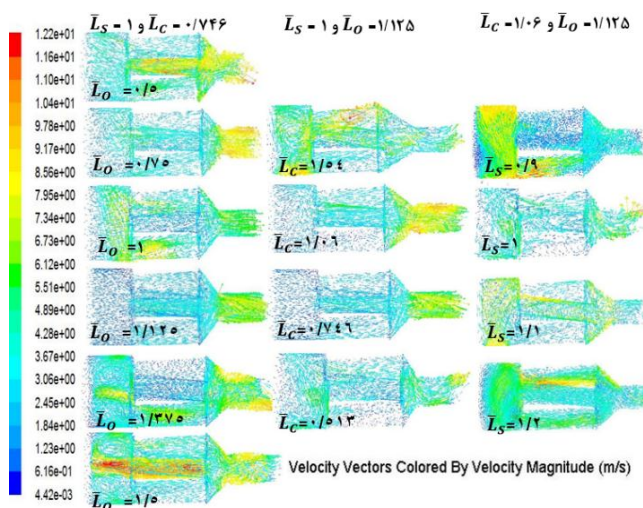
همچنین مدل سازی سه بعدی و مش بندی مجموعه نازل و انژکتور مورد بحث نیز در نرم افزار گمبیت انجام پذیرفته است. المان به کارگیری شده در سطوح از نوع Quad، و نوع به کارگیری شده در اجسام، از نوع Tet/Hybrid است. با توجه به اهمیت مقادیر مربوط به فشار و سرعت در نزدیکی دیواره ها و به منظور افزایش دقت محاسبات مذکور، از یک شبکه بدون ساختار، در جهت طولی و در لایه های مجاور بدنه استفاده شده است. این شبکه در نزدیکی دیواره ها، بسیار فشرده تر از نواحی مرکزی و داخلی نازل است. در واقع در نزدیکی دیواره ها، شبکه خاص لایه مرزی ایجاد شده است. همچنین با توجه به شکل (۹)، شبکه حوالی صفحه پاشش، با هدف افزایش دقت محاسبات، تراکم تر شده است.

به منظور تعیین استقلال حل از شبکه در نظر گرفته شده، مدل نازل مطابق شکل (۱۰)، با پاشش جت جانبی و با سه حجم سلول مختلف به مقادیر ۱۸۲۷۸۶، ۵۷۱۳۴۱ و ۱۱۴۲۵۵۳ عدد مش بندی و حل شد. در طی این سه حل، پارامتر ثابت سرعت خروجی ( $V_e$ )، اندازه گیری و مقادیر با یکدیگر مقایسه گردید. از آنجایی که نتایج دو حل دوم و سوم اختلاف بسیار ناچیزی در حدود ۲٪ داشت، بنابراین شبکه بندی با تعداد سلول حدود ۳۵۹۳۰۲ و تعداد گره ۷۱۱۴۱، به عنوان تعداد نهایی سلول ها، به منظور حل عددی نازل، انتخاب و معرفی می گردد. جدول (۳) اطلاعات کامل این مطالعه را نشان می دهد.

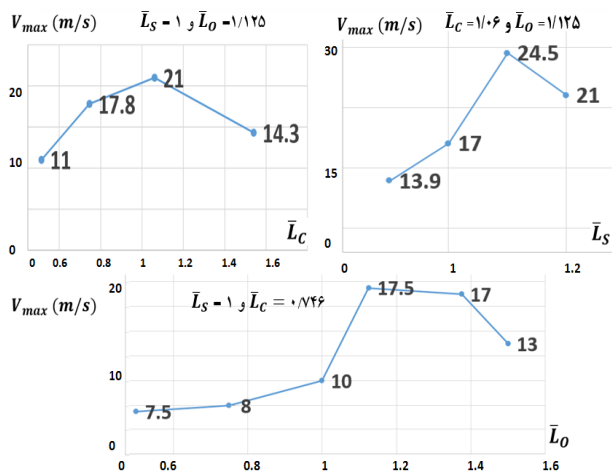
همچنین مشاهده می شود که کمینه افت فشار در هر شکل، در اواسط مقادیر منتخب است و این نتایج با تعداد آزمایش های لازم و کافی به دست آمده است. بنابراین بر اساس هدف کمترین افت فشار، مقادیر بهینه تقریبی سه پارامتر هندسی انژکتور، به صورت زیر قابل انتخاب است:

$$\bar{L}_O = 1/2, \bar{L}_C = 1, \bar{L}_S = 1/1$$

اعتبارسنجی نتایج طراحی انژکتور: نتایج طراحی و مقادیر هندسی محاسباتی بر اساس تلفیق روابط مهندسی و نتایج حل عددی در این تحقیق با نتایج تحقیقات پیشین تطابق مناسبی دارد. ساخت و آزمایش تعدادی انژکتور در تحقیقات مورد اشاره، بر دقت و اعتبار نتایج تحقیقات مقاله حاضر می افزاید [۶، ۹، ۱۰ و ۱۲]. به کمک میانبایی نتایج جداول (۵) و (۶)، ملاحظه می شود که در  $\bar{L}_O = 1/15$ ،  $\bar{L}_S = 1/1$  و  $\bar{L}_C = 1/05$  بیشترین سرعت دهانه پاشش و کمترین مقدار افت فشار رخ می دهد که این مقادیر به عنوان نتایج طراحی انژکتور معرفی می گردند. جدول (۷) نتایج این بخش از تحقیق و طراحی انژکتور را نشان می دهد.



شکل ۱۱- کانتور سرعت انژکتورها در سه سری پارامتر بدون بعد  $\bar{L}_O$ ،  $\bar{L}_C$  و  $\bar{L}_S$



شکل ۱۲- نمودار سرعت دهانه پاشش انژکتور در سه پارامتر  $\bar{L}_O$ ،  $\bar{L}_C$  و  $\bar{L}_S$

نتایج همگرایی حل سه پارامتر بدون بعد  $\bar{L}_C$ ،  $\bar{L}_O$  و  $\bar{L}_S$ : به منظور افزایش دقت و اطمینان از همگرایی نتایج، موازنه دبی جرمی دو سر ورودی و خروجی انژکتورها مورد سنجش قرار گرفته است. جدول (۴) اطلاعات مربوط به مقادیر دبی جرمی ورودی و خروجی و همچنین میزان اختلاف بین آنها، برای هر انژکتور را نمایش می دهد. در هر مرتبه محاسبات، مقادیر مربوط به دو پارامتر هندسی دیگر ثابت فرض شده اند.

جدول ۴- همگرایی دبی های ورودی و خروجی انژکتورها (بر حسب  $kg/s$ )

پارامتر	مقدار پارامتر	دبی ورودی	دبی خروجی	اختلاف دبی
$\bar{L}_O$	0/5	0/555100	0/555065	3/53e-5
	0/75	0/555100	0/555114	1/37e-5
	1	0/555100	0/555119	1/9e-5
	1/125	0/555100	0/5554981	1/19e-4
	1/375	0/555100	0/5554981	1/26e-5
	1/5	0/555100	0/555159	5/93e-5
$\bar{L}_C$	1/54	0/555100	0/5553045	2e-3
	1/06	0/555100	0/5556160	e-3
	0/746	0/555100	0/5554981	1/1e-4
	0/513	0/555100	0/5554887	2e-4
$\bar{L}_S$	0/9	0/555100	0/555216	1/16e-4
	1	0/555100	0/5554957	1/5e-4
	1/1	0/555100	0/5554949	1/51e-4
	1/2	0/555100	0/555048	5/18e-5

تحلیل سرعت سه پارامتر  $\bar{L}_O$ ،  $\bar{L}_C$  و  $\bar{L}_S$ : در شکل (۱۱) چگونگی کانتورهای سرعت برای هر سه پارامتر بدون بعد  $\bar{L}_O$ ،  $\bar{L}_C$  و  $\bar{L}_S$ ، در تصویر آمده است.

جدول (۵) بیشینه مقادیر سرعت دهانه پاشش انژکتورهای مختلف را نشان می دهد. بر این اساس، نمودار شکل (۱۲) ترسیم گردیده است. همان طور که در این شکل دیده می شود، افزایش مقدار سرعت تا حد مطلوب، موجب بالا رفتن سرعت بیشینه در دهانه خروجی انژکتور، و سپس موجب کاهش آن می شود. بر اساس هدف سرعت بیشینه، مقادیر بهینه تقریبی سه پارامتر هندسی انژکتور، به صورت زیر قابل انتخاب است.  $\bar{L}_O = 1/2, \bar{L}_C = 1/0, \bar{L}_S = 1/1$

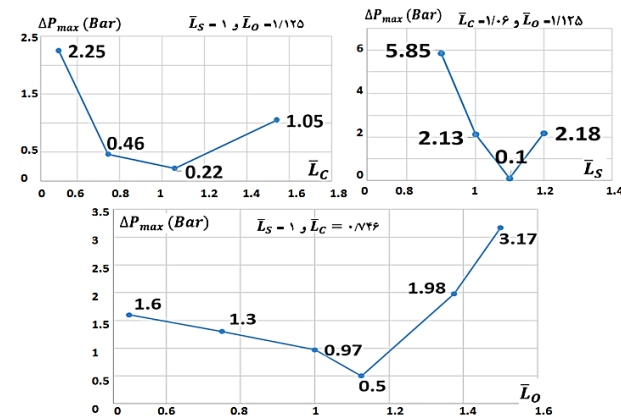
تحلیل فشار سه پارامتر بدون بعد  $\bar{L}_O$ ،  $\bar{L}_C$  و  $\bar{L}_S$ : در شکل (۱۳) چگونگی کانتورهای فشار برای هر سه پارامتر بدون بعد  $\bar{L}_O$ ،  $\bar{L}_C$  و  $\bar{L}_S$ ، به تصویر کشیده شده است. جدول (۶) مقادیر اختلاف فشار دو سر ورودی و خروجی انژکتورهای مختلف را نشان می دهد. بر این اساس، نمودار شکل (۱۴) ترسیم گردیده است. افت فشار در این انژکتورها، به طور کلی، در محدوده مجاز انژکتورهای گریز از مرکز مخروط کامل است [۱۲].

**جدول ۶-** مقادیر اختلاف فشار بین دو سر ورودی و خروجی انژکتورها در سه پارامتر بدون بعد  $\bar{L}_S$  و  $\bar{L}_C$  و  $\bar{L}_O$

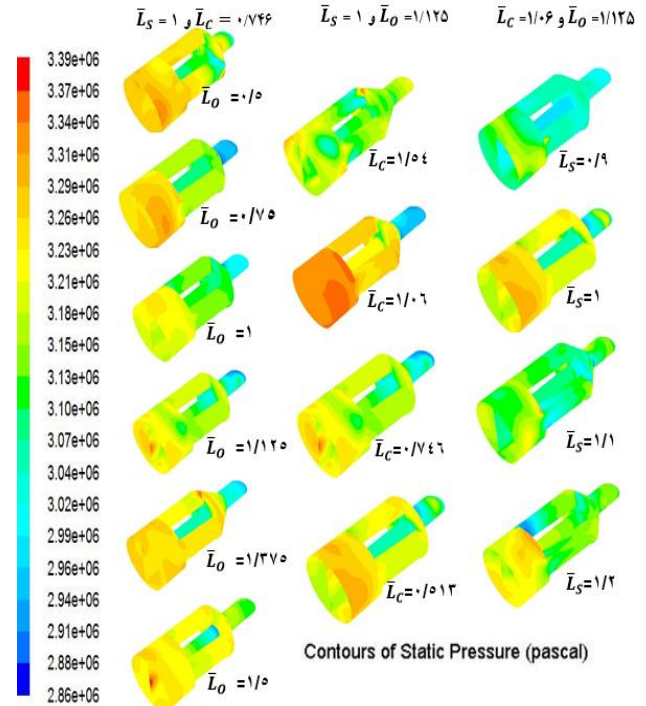
پارامتر	مقدار پارامتر	اختلاف فشار دو سر انژکتور (Bar)
$\bar{L}_O$	۰/۵	۱/۶
	۰/۷۵	۱/۳
	۱	۰/۹۷
	۱/۱۲۵	۰/۵
	۱/۳۷۵	۱/۹۸
	۱/۵	۳/۱۷
$\bar{L}_C$	۱/۵۴	۱/۰۵
	۱/۰۶	۰/۲۲
	۰/۷۴۶	۰/۴۶
	۰/۵۱۳	۲/۲۵
$\bar{L}_S$	۰/۹	۵/۸۵
	۱	۲/۱۳
	۱/۱	۰/۱
	۱/۲	۲/۱۸

**جدول ۵-** بیشینه سرعت دهانه پاشش انژکتورها در سه پارامتر بدون بعد  $\bar{L}_O$  و  $\bar{L}_C$  و  $\bar{L}_S$

پارامتر	مقدار پارامتر	بیشینه سرعت خروجی (m/s)
$\bar{L}_O$	۰/۵	۷/۵
	۰/۷۵	۸
	۱	۱۰
	۱/۱۲۵	۱۷/۵
	۱/۳۷۵	۱۷
	۱/۵	۱۳
$\bar{L}_C$	۱/۵۴	۱۴/۳
	۱/۰۶	۲۱
	۰/۷۴۶	۱۷/۸
	۰/۵۱۳	۱۱
$\bar{L}_S$	۰/۹	۱۳/۹
	۱	۱۷
	۱/۱	۲۴/۵
	۱/۲	۲۱



**شکل ۱۴-** نمودار اختلاف فشار دو سر ورودی و خروجی انژکتور در سه سری پارامتر  $\bar{L}_S$  و  $\bar{L}_C$  و  $\bar{L}_O$



**شکل ۱۳-** کانتور فشار انژکتورها در سه پارامتر بدون بعد  $\bar{L}_O$  و  $\bar{L}_C$  و  $\bar{L}_S$

**جدول ۷-** اعتبار سنجی نتایج هر سه پارامتر بدون بعد  $\bar{L}_S$  و  $\bar{L}_C$  و  $\bar{L}_O$

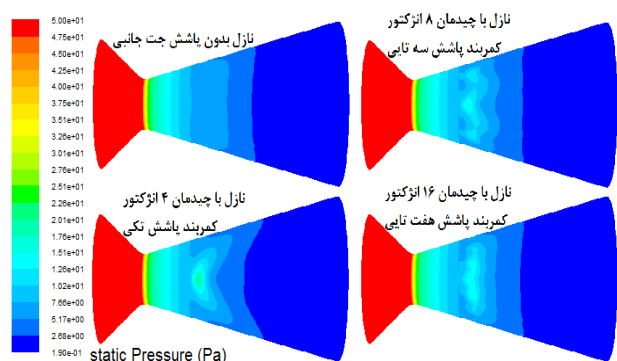
$\bar{L}_S$	$\bar{L}_C$	$\bar{L}_O$	نوع نتایج
$\bar{L}_S \geq 1/5 D_i$	$60^\circ \leq \beta \leq 120^\circ$	$0.25 \leq \bar{L}_O \leq 1$	تحقیقات پیشین [۱۰]
۱/۱	$1/732 \leq \bar{L}_C \leq 5/2$	۱/۱۲۵	تحقیق حاضر
۱/۱۸	محدوده مجاز	۰/۲/۲	خطا

**نتایج همگرایی حل جریان:** به منظور افزایش دقت و اطمینان از همگرایی نتایج، موازنه دبی جرمی دو سر ورودی و خروجی نازل در هر چیدمان انژکتور مورد سنجش قرار گرفت. جدول (۸) اطلاعات مربوط به مقادیر دبی جرمی ورودی و خروجی و همچنین میزان اختلاف بین آنها، برای هر نازل را نمایش می‌دهد.

**۲-۳- نتایج طراحی کمر بند پاشش**

بررسی و نتایج طراحی کمر بند پاشش، بر اساس مدل سازی معادلات فاز گسسته (معادلات مومنتوم، انرژی و آشفستگی) بوده و ضمن مطالعه همگرایی نتایج حل عددی، به محاسبه و تحلیل فشار و سرعت، و در ادامه به محاسبه نیروی تراست نازل و میزان انحراف ایجاد شده توسط جت جانبی پرداخته شده است.





شکل ۱۶- توزیع فشار روی سطح داخلی نازل در چیدمان‌های مختلف کمربند پاشش.

جدول ۹- مقادیر کمیت‌های مورد نیاز جهت محاسبه مقدار و زاویه انحراف بردار تراست.

پاشش تایی ۷	پاشش تایی ۳	پاشش تکی	بدون جت	پارامتر طراحی
				سرعت خروجی (متر بر ثانیه)
				۱۹۵۲/۶
				فشار خروجی (پاسکال)
				-۶۳۱۷۱/۶۴
				دبی کل (کیلوگرم بر ثانیه)
				۶/۲
				تراست اصلی (نیوتن)
				۱۱۳۱۳
				تراست جانبی (نیوتن)
۵۷۵	۵۲۰	۴۹۴	---	
				زاویه انحراف تراست (درجه)
۲/۹	۲/۶۳	۲/۵	---	

همچنین با توجه به مقدار تراست جانبی ایجاد ناشی از پاشش انژکتور، با به‌کارگیری رابطه (۲)، میزان زاویه انحراف تراست توسط کمربند پاشش، محاسبه و در جدول (۹) آورده شده است.

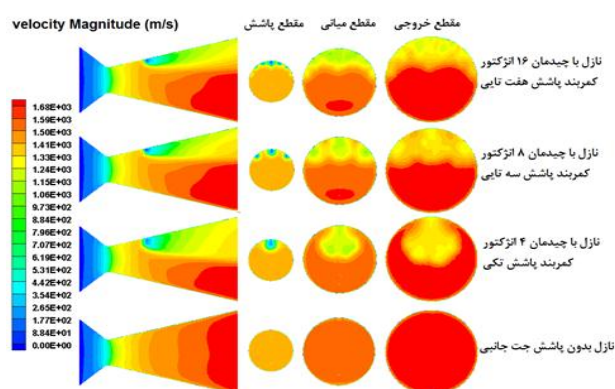
### ۳-۴- اعتبارسنجی نتایج حل عددی کمربند پاشش

مقایسه نتایج حاصل از محاسبه نسبت تراست جانبی ( $T_{inj}$ ) به تراست اصلی نازل ( $T_{total}$ )، نشانگر از همخوانی نتایج شبیه‌سازی عددی حاضر با یکدیگر و با نتایج تحقیقات پیشین است. لازم به ذکر است که در اکثر تحقیقات پیشین، حداکثر زاویه انحراف تراست را ۶ درجه معرفی کرده‌اند، بنابراین مقادیر زاویه انحراف تراست در تحقیق حاضر، با توجه به متوسط بودن نسبت دبی پاشش به دبی کل جریان اصلی، معقول و منطقی به نظر می‌رسند [۸ و ۱۰]. در جدول (۱۰) یک نمونه مقایسه نتایج حاضر با نتایج تحقیقات پیشین نمایش داده شده است. توجه شود که تحقیقات پیشین مرجع در این جدول، حاصل تحلیل تئوری به همراه نتایج آزمایشگاهی بوده است [۱۵].

جدول ۸- اطلاعات مربوط به توازن دبی جرمی در ورودی و خروجی نازل‌ها با کمربند‌های پاشش مختلف (بر حسب  $kg/s$ ).

نوع نازل	دبی ورودی	دبی خروجی	اختلاف دبی	دبی تبخیر
بدون جت جانبی	۶/۱۱	۵/۷	۴e-۱	---
پاشش تکی	۵/۳۷	۶	۵/۹e-۱	۰/۰۵۵
پاشش تایی ۳	۵/۹	۶/۱	۹/۷e-۳	۰/۱۷۸
پاشش تایی ۷	۶/۲	۶/۷	۳e-۱	۰/۱۱۴

نتایج تحلیل سرعت: در شکل (۱۵) توزیع سرعت در نازل‌های انواع چیدمان پاشش ارائه شده است. در چیدمان ۱۶ انژکتور جریان مجاور پاشش نسبت به جریان کلی داخل نازل (در مقایسه با چیدمان ۴ انژکتور) تغییر بیشتری یافته است.



شکل ۱۵- نمایش مقاطع طولی و جانبی کانتورهای سرعت درون نازل در چیدمان‌های مختلف کمربند پاشش.

نتایج تحلیل فشار: در شکل (۱۶) نتایج توزیع فشار در نازل‌های با کمربند‌های مختلف پاشش به نمایش در آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود عدم تقارن و اختلاف فشار روی سطح مخروط بخش واگرای نازل (بین مسیر یال پاشش و سطح مقابل آن)، در چیدمان ۱۶ انژکتور به نسبت بیشتر بوده و بنابراین انحراف بردار تراست بیشتری را ایجاد خواهد کرد.

### ۳-۳- محاسبه مقدار و زاویه انحراف بردار تراست

با توجه به مقادیر سرعت و فشار خروجی نازل و مشخصات جت جانبی و همچنین به‌کارگیری رابطه (۱)، مقادیر تراست محوری و سپس تراست جانبی و زاویه انحراف بردار تراست کل، محاسبه می‌گردد. همان‌طور که در جدول (۹) نمایش داده شده است، بر اساس نتایج سرعت و فشار خروجی نازل برای نازل بدون جت جانبی، تراست کلی نازل به مقدار ۱۱۳۱۳ نیوتن به‌دست آمده است.

مشخصات در طراحی انژکتورها، هم‌زمان بیشترین سرعت خروجی و کمترین افت فشار در جریان درون انژکتور حاصل می‌شود.

### مراجع

- [1] Sutton, G. P.; Biblarz, O. "Rocket Propulsion Elements"; John Wiley & Sons Inc., Hohoken, New Jersey, 2001, 32-33, 108-111.
- [2] Ko, H.; Yoon, W. "Performance Analysis of Secondary Gas Injection into a Conical Rocket Nozzle"; J. Propul. Power, 2002, 18, 585-591.
- [3] Huzel, D. K.; Huang, D. H. "Modern Engineering for Design of Liquid Propellant Rocket Engines"; Am. Inst. Aeronaut. Astronaut. 1992, 147, 209.
- [4] Masuya, G. "Secondary Gas Injection into a Supersonic Conical Nozzle"; Am. Inst. Aeronaut. Astronaut. 1977, 15, 301-302.
- [5] حیدری، محمدرضا؛ پورامیر، علیرضا "تحلیل چیدمان انژکتورها و توزیع دبی پاشش برای کنترل بردار تراست به روش پاشش مایع؛" مجله علمی پژوهشی مواد پرنانژی، سال نهم، شماره ۱، صفحه ۴۳-۲۹، ۱۳۹۳.
- [6] Nada, T. R.; Hashem, A. A. "Geometrical Characterization and Performance Optimization of Monopropellant Thruster Injector"; 2012, 15, 161-169
- [7] Bach, C.; Sieder, J. "Development of a 500 N LOX/ETHANOL-Sounding Rocket for the DLR STERN program"; Deutscher Luft-und Raumfahrt kongress 2013, Doc. ID. 301353.
- [8] Tani, H.; Okamoto, K. "Effects of Injector Geometry on Cryogenic Shear Coaxial Jets at Supercritical Pressures"; J. Propul. Power 2015, 31, 883-888.
- [9] کاظمی، کریم؛ مظاهری، کریم "بررسی تجربی تأثیر پارامترهای هندسی انژکتور پیچشی بر عملکرد آن با استفاده از سامانه PDA؛" نشریه بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، شماره ۳، صفحه ۱۲۹-۱۲۱، ۱۳۸۷.
- [۱۰] آمی، فتح اله؛ موحد نژاد، احسان؛ کارگر، امیر "طراحی انژکتور گریز از مرکز دو پایه برای افزایش ایمپالس ویژه در موتور موشک سوخت مایع؛" نشریه مکانیک و هوا فضا، شماره ۱، صفحه ۲۲-۱۱، ۱۳۸۶.
- [۱۱] حیدری، محمدرضا؛ پورامیر، علیرضا "شبیه‌سازی کنترل بردار تراست به روش پاشش تک انژکتور سیال مایع؛" مجله علمی پژوهشی مواد پرنانژی، سال ششم، شماره ۱، صفحه ۴۳-۳۳، ۱۳۹۰.
- [۱۲] حسینعلی پور، سید مصطفی؛ کریمایی، حدیثه؛ آمی، فتح اله "طراحی، شبیه‌سازی عددی و آزمایش یک انژکتور گریز از مرکز با ورودی‌های مماسی؛" نشریه علمی پژوهشی سوخت و احتراق، سال هفتم، شماره ۲، صفحه ۹۷-۱۱۰، ۱۳۹۳.
- [13] Lee, E.; Kang, H.; Kwon, S. "Demonstration of Thrust Vector Control by Hydrogen Peroxide Injection in Hybrid Rockets"; J. Propul. Power 2019, 35, 109-114.
- [14] Noaman, H. R.; Tang, H. B.; Khalil, E. "Numerical Simulation on the Influence of Injection Location, Injection Angle, and Divergence Half Angle on SITVC Nozzle Flow Field"; Hindawi, Int. J. Aerospace Eng. 2019, ID. 7392497.
- [15] Tsohas, J.; Doppers, L. J.; Dambach, E. M.; Heister, S. D. "Progress in Technology Demonstration for a Small Hybrid Launch Vehicle"; 5<sup>th</sup> Responsive Space Conference 2007, AIAA-RS5-2007-5004.

جدول ۱۰- مقایسه یک نمونه از نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات پیشین.

پارامتر طراحی	تحقیقات پیشین [۱۵]	کمر بند پاشش ۷ تایی
دبی تزریق (کیلوگرم بر ثانیه)	۰/۲	۰/۵۵۵۱
تراست اصلی (نیوتن)	۴۰۰۰	۱۱۳۱۳
تراست جانبی (نیوتن)	۳۵۰	۵۷۷
زاویه انحراف بردار تراست (درجه)	۵	۲/۹

### ۴- نتیجه‌گیری

نتیجه‌نهایی حاصل از طراحی و بهینه‌سازی سه پارامتر بدون بعد ذکر شده در این تحقیق برای طراحی و چیدمان انژکتورها به شرح زیر است: ۱- با افزایش مقدار هر سه پارامتر بدون بعد، ابتدا روند تغییر سرعت، صعودی است، اما این افزایش فقط تا نقطه بهینه (سرعت بیشینه) ادامه دارد و پس از عبور از آن، روند اندازه سرعت، نزولی خواهد شد.

۲- با افزایش مقدار سرعت خروجی انژکتور، نیروی تراست نیز افزایش می‌یابد و همان‌طور که پیش‌بینی می‌شود، این افزایش فقط تا نقطه بیشینه سرعت ادامه دارد و پس از آن، روند تغییر نیروی تراست نیز نزولی خواهد شد.

۳- افزایش سرعت خروجی انژکتور تا نقطه بیشینه، موجب کاهش افت فشار انژکتور می‌گردد، و بالعکس. ملاحظه می‌شود انژکتورهایی که بهترین سرعت پاشش از دهانه را دارند، کمترین افت فشار را نیز ایجاد کرده‌اند.

پاشش جت جانبی به درون میدان جریان نازل، یکی از چهار روش مرسوم کنترل بردار تراست است. در این روش عوامل متعددی موجب افزایش راندمان و بهبود عملکرد سامانه می‌شوند. از جمله مهم‌ترین این پارامترها می‌توان به هندسه انژکتورهای به‌کار گرفته شده و همچنین نوع چیدمان انژکتورها اشاره کرد، که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که زاویه انحراف بردار تراست که معرف راندمان عملکرد سامانه است، برای چیدمان ۱۶ انژکتور و بالاتر از آن، بیشتر از چیدمان ۸ انژکتور و کمتر از آن است.

در این تحقیق، دبی پاشش هر انژکتور ۳ برابر انژکتور بعدی همسایه در نظر گرفته شد. همچنین با فرض سایر شرایط مسئله، مانند نوع نازل، نوع انژکتورها و آرایش آن‌ها، نوع مایع پاشش، نسبت دبی پاشش، زاویه پاشش و موقعیت پاشش، در نهایت مشخصات هندسی مورد نظر و مطلوب در انژکتورها، به صورت  $\bar{L}_0 = 1/15$  و  $\bar{L}_C = 1/05$  و  $\bar{L}_S = 1/1$  به دست آمد، که مخصوص موارد مشابه با این مسئله است و در سایر طرح‌ها باید پارامترهای هندسی انژکتورها، متناسب با شرایط مسئله، مورد مطالعه و محاسبه و تحلیل قرار گیرد. با لحاظ کردن این