

Design and Simulation of Single Capillary Injector and Circular Injector Plate for a Monopropellant Thruster

Sajad Davari¹ and Hadiseh Karimaei^{2*} 

1. Ph.D. Candidate, Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

*Corresponding Author's E-mail: karimaei@ari.ac.ir

Abstract

Hydrazine monopropellant thrusters are widely used in space missions. The most common use of these thrusters is in reactive control systems. In this research, design and simulation of a single capillary injector and three-hole circular injector plate of a 10N Hydrazine monopropellant thruster were performed. The injector and injector plate were designed based on the mass flow rate. Ansys Fluent software was used to simulate them. Volume of fluid (VOF) method was used to simulate such a flow and turbulence was simulated by *k-ε* model. The characteristics of the injector and injector plate including mass flow rate and average velocity in the injector nozzle were calculated by changing the inlet pressure. The results showed that the injector and the injector plate have the ability to supply the desired mass flow rate of the monopropellant thruster at a known design pressure. Therefore, the final dimensions were selected for the design and construction of the injector. In fact the capillary injector has replaced the swirl injector with hollow cone spray used in the previous version of this thruster. The dimension of the chamber was significantly reduced by using the capillary injector, which reduces both the volume of the expensive iridium catalyst and weight of the thruster.

Keywords: Capillary injector, Injector plate, Monopropellant thruster, Hydrazine thrusters, Low thrust



COPYRIGHTS

© 2022 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [the Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

How to cite this article:

S. Davari and H. Karimaei, "Design and Simulation of Single Capillary Injector and Circular Injector Plate for a Monopropellant Thruster," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 15, No. 3, pp. 109-118, 2022 (in Persian), <https://doi.org/10.30699/jsst.2021.1314>.

طراحی و شبیه‌سازی تک‌انژکتور کاپیلاری و صفحه انژکتور دایروی برای میکروانشر تک‌مؤلفه‌ای کم‌پیشنار

سجاد داوری^۱ و حدیثه کریمایی^{۲*}

پژوهشگاه هوافضا، گروه علوم فضایی، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

*ایمیل نویسنده مخاطب: karimaei@ari.ac.ir

چکیده

میکروانشرهای تک‌مؤلفه‌ای هیدرازینی به‌طور گسترده در مأموریت‌های فضایی استفاده می‌شوند. بیشترین کاربرد این میکروانشرها در سیستم‌های کنترلی واکنشی است. در این پژوهش ابتدا طراحی و شبیه‌سازی انژکتور کاپیلاری تک و سپس طراحی و شبیه‌سازی صفحه انژکتور دایروی سه سوراخه یک میکروانشر تک‌مؤلفه‌ای هیدرازینی ۱۰ نیوتنی انجام گرفت. در مرحله طراحی بر اساس دبی جرمی مورد نیاز میکروانشر، انژکتور و صفحه انژکتور طراحی شدند. به‌منظور شبیه‌سازی انژکتور و صفحه انژکتور از نرم‌افزار آنسیس فلونت استفاده شد. بدین منظور روش حجم سیال (VOF) به‌کار گرفته شد و آشفتگی جریان هم با استفاده از مدل $k-\epsilon$ شبیه‌سازی شد. در مرحله تحلیل، تعدادی اجرا گرفته شد و در این اجراها با تغییر فشار ورودی انژکتور و صفحه انژکتور حول مقادیری که از طراحی بدست آمدند، مشخصه‌های موردنظر انژکتور و صفحه انژکتور از جمله دبی جرمی و سرعت متوسط در دهانه نازل خروجی انژکتور محاسبه شد. با بررسی نتایج، مشخص شد، انژکتور و صفحه انژکتور طراحی شده توانایی تأمین دبی جرمی مورد نظر میکروانشر را در اختلاف فشار معین طراحی دارند. از این روابط نهایی برای ساخت و استفاده در میکروانشر تک‌مؤلفه‌ای هیدرازینی ۱۰ نیوتنی انتخاب شدند. در نسخه قبلی این میکروانشر ۱۰ نیوتنی، از انژکتور جریان پیچشی با پاشش چتری توخالی استفاده شده بود. اما در طرح جدید با انژکتور کاپیلاری به دلیل چتر کوچک و توپر انژکتور، طراح محفظه کاتالیستی قادر است تا ابعاد محفظه را به اندازه چشمگیری کاهش دهد که هم حجم کاتالیست مصرفی گران‌قیمت ایریدیوم کاهش می‌یابد و هم بالطبع ابعاد و وزن میکروانشر کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: انژکتور کاپیلاری، صفحه انژکتور، میکروانشر تک‌مؤلفه‌ای، میکروانشر هیدرازینی، کم‌پیشنار

مقدمه

میکروانشرهای تک‌مؤلفه‌ای یکی از بهترین گزینه‌ها برای قرار دادن ماهواره‌های کوچک در مدار هستند، به ویژه هنگامی که برای این کار به نیروی تراست قابل توجهی نیاز باشد. انژکتور یکی از عناصر اصلی این میکروانشرهاست. وظیفه انژکتور در یک میکروانشر تک‌مؤلفه‌ای این است که سوخت مایع را به قطرات ریز تبدیل کرده و

علائم و اختصارات

$m_{\phi D}$	دبی واقعی انژکتور
μ_{ϕ}	ضریب دبی
F_c	سطح مقطع نازل انژکتور
Δp_{ϕ}	اختلاف فشار دو طرف انژکتور
ρ_*	چگالی سیال عامل
$m_{\phi I}$	دبی ایده‌آل انژکتور

حسینعلی پور و همکاران [۶-۷] با تحلیل جریان داخلی انژکتور به این نتیجه رسیدند که توزیع پاشش در انژکتور به هندسه داخلی آن مرتبط می‌باشد. کریمائی [۸] یک انژکتور جریان چرخشی اسپری مخروطی با دو ورودی مماسی به عنوان انژکتور سوخت یک میکروانژکتور تک‌مؤلفه‌ای هیدرازینی با پیشران ۱۰ نیوتن را طراحی، شبیه‌سازی و تست کرد. جریان داخل انژکتور به منظور پیش‌بینی مشخصه‌های جریان خروجی و اطمینان از شکل‌گیری حفره گاز درون آن شبیه‌سازی شد. وی نتیجه گرفت که دبی جرمی مورد نظر در اختلاف فشار معین طراحی توسط انژکتور تأمین می‌شود و حفره هوا داخل انژکتور تا انتهای آن تشکیل می‌شود. کریمائی و همکاران [۹] برای طراحی میکروانژکتور تک‌مؤلفه‌ای هیدرازینی ۱۰ نیوتنی از یک انژکتور جریان پیچشی با ورودی‌های مماسی و مخروط اسپری توخالی با زاویه متوسط استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که انژکتور طراحی شده قابلیت تأمین دبی جرمی مورد نیاز میکروانژکتور را دارد.

در مقاله حاضر، روند طراحی و شبیه‌سازی تک‌انژکتور و صفحه انژکتور سه سوراخه یک میکروانژکتور تک‌مؤلفه‌ای هیدرازینی ۱۰ نیوتنی ارائه شده است. انژکتور انتخاب شده برای هر دو حالت از نوع انژکتور جریان مستقیم یا کاپیلاری می‌باشد. به منظور دستیابی به مشخصه‌های لایه سیال خروجی از انژکتور، مدلسازی و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی برای انژکتور و صفحه انژکتور انجام شد. هدف از مدلسازی جریان داخلی انژکتور در مقاله حاضر، تأمین مشخصه‌های مورد نیاز است. در تکرارهای طراحی^۶ مختلف، امکان ساخت و آزمایش کردن انژکتور وجود ندارد و اصولاً پس از نهایی کردن طراحی، انژکتور ساخته می‌شود و در آزمایشگاه آزمایش می‌شود. به همین دلیل، تحلیل عددی می‌تواند در مراحل طراحی بسیار کمک‌کننده باشد و به اصلاح طراحی کمک کند. در نسخه قبلی این میکروانژکتور ۱۰ نیوتنی، از انژکتور جریان پیچشی با پاشش چتری توخالی استفاده شده بود. اما در طرح جدید با انژکتور کاپیلاری به دلیل چتر کوچک و توپر انژکتور، طراح محفظه کاتالیستی قادر است تا ابعاد محفظه را به اندازه چشمگیری کاهش دهد که هم حجم کاتالیست مصرفی گران‌قیمت ایریدیوم کاهش می‌یابد و هم بالتبع ابعاد و وزن میکروانژکتور کاهش می‌یابد.

اصول طراحی انژکتور

پارامترهای اساسی طراحی انژکتور شامل موارد زیر است که عملکرد بهینه انژکتور توسط آن‌ها تعیین می‌شود که عبارتند از [۱۰]:

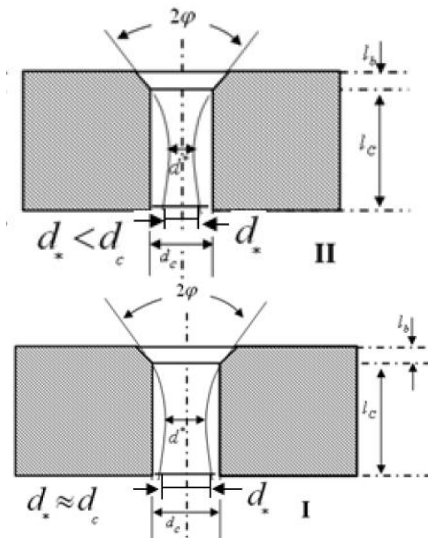
۱. دبی خروجی از انژکتور:

$$\dot{m}_{\phi D} = \mu_{\phi} F_c \sqrt{2 \Delta p_{\phi} \rho^*} \quad (1)$$

تا حد ممکن به صورت یکنواخت بر روی بستر کاتالیستی توزیع کند. در نتیجه قطرات سوخت توسط گرانول‌های کاتالیست جذب و تجزیه می‌شود. بر همین اساس، عملکرد مناسب انژکتور تأثیر مستقیم بر افزایش راندمان تجزیه دارد. فرآیند قطره‌سازی^۳ را می‌توان فرآیندی که در آن حجمی از مایع به تعداد زیاد قطره تبدیل می‌شود تعریف کرد. برای درک بهتر یک فرآیند اتمیزاسیون، انجام مدل‌سازی عددی در کنار آزمایش‌های جامع تجربی از دو دهه قبل رایج شده است. روش‌های مدرن بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) توانسته‌اند نتایج دقیقی برای پیش‌بینی فرآیندهای اسپری بدست دهند. با توجه به پیچیدگی دینامیک سیال در داخل انژکتورهای کوچک، اندازه‌گیری تجربی در بسیاری موارد، کار بسیار سخت و پرهزینه‌ای است. از این رو روش دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند نتایج دقیق‌تری که مورد نیاز است را راحت‌تر در دسترس قرار دهد. در طی دهه اخیر نیز، با افزایش امکانات سخت‌افزاری و قابلیت‌های محاسباتی، تلاش بسیاری در توسعه مدل‌سازی‌های عددی دقیق، شده است.

شانکار و همکاران [۱-۲] به صورت تجربی یک میکروانژکتور هیدرازینی ۱۰ نیوتنی را با فشارهای مختلف منبع تغذیه مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها برای پاشش هیدرازین از یک انژکتور کاپیلاری^۴ یا جریان مستقیم^۵ استفاده کردند. بر اساس پژوهش آن‌ها این انژکتور دبی جرمی مورد نیاز میکروانژکتور را تأمین کرد و هیدرازین به‌طور کامل به محفظه کاتالیستی منتقل شد. هینکل و همکاران [۳] یک میکروانژکتور هیدرازینی ۳۵ نیوتنی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از یک صفحه انژکتور کاپیلاری هفت سوراخه برای پاشش هیدرازین استفاده کردند. آرایش صفحه انژکتور به این صورت بود که یک انژکتور در وسط و بقیه انژکتورها در اطراف قرار دارند. آن‌ها بیان کردند که پاشش هیدرازین از طریق این صفحه انژکتور به خوبی صورت گرفته است و مشخصه‌های مورد نیاز میکروانژکتور توسط این صفحه انژکتور تأمین می‌شود. نادا و همکاران [۴] تأثیر پارامترهای هندسی انژکتور یک میکروانژکتور هیدرازینی را بر عملکرد آن مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دو نوع انژکتور شامل یکی انژکتور جریان مستقیم و دیگری انژکتور فشاری چرخشی را مطالعه کردند. به‌منظور بهینه‌سازی پارامترهای هندسی انژکتور، نمودارهای طراحی انژکتور توسط آن‌ها معرفی شد. آن‌ها بیان کردند که انژکتور فشاری چرخشی گزینه مناسب‌تری برای میکروانژکتورهای تک‌مؤلفه‌ای است ولی در عین حال روش ساخت پیچیده‌تری دارد.

فرانکن و همکاران [۵] یک میکروانژکتور ۱ نیوتنی با سوخت آب اکسیژنه را طراحی کردند. آن‌ها در این طراحی به‌منظور پاشش آب اکسیژنه به داخل محفظه کاتالیستی از انژکتور کاپیلاری استفاده کردند.



$$\frac{l_c}{d_c} = 2-3 \quad \frac{l_c}{d_c} = 0.5-1$$

$$\mu_\phi = 0.75-0.85 \quad \mu_\phi = 0.6-0.65$$

شکل ۱- مقادیر ضریب صنعتی برای انژکتور جریان مستقیم در دو حالت L_C [۱۰]

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش l_c مقدار d_* به d_c نزدیک‌تر می‌شود. با توجه به مطالب مذکور می‌توان سطح دهانه نازل انژکتور جریان مستقیم (F_C) را محاسبه نمود و از آنجا قطر نازل (d_c) را به دست آورد و سپس طول انژکتور (l_c) را محاسبه کرد. لازم به توضیح است که اگر پخ ورود سیال به انژکتور با زاویه 2ϕ وجود نداشته باشد، مقدار ضریب دبی (μ_ϕ) به شدت کاهش پیدا می‌کند. این پخ نباید خیلی طولانی باشد چون بر اساس اصطکاک سرعت ورود سیال به انژکتور کاهش پیدا می‌کند و همچنین نباید خیلی کوتاه باشد، از این رو باید با آزمایش، مقدار آن را بهینه کرد که معمولاً در صنعت برابر است با:

$$90^\circ < 2\phi < 120^\circ$$

با توجه به مطالب ذکر شده، ترتیب محاسبه انژکتور جریان مستقیم یک پایه به شرح ذیل است:

- ۱- تعیین دبی انژکتور
 - ۲- تعیین سطح دهانه خروجی نازل انژکتور و از آنجا تعیین قطر دهانه نازل انژکتور که مقادیر اختلاف فشار (ΔP_ϕ) و ضریب دبی (μ_ϕ) بر اساس نظر طراحان انتخاب می‌شود.
 - ۳- تعیین طول نازل انژکتور که با توجه به مقادیر پیشنهادی و با داشتن قطر نازل (d_c) به دست می‌آید.
 - ۴- تعیین زاویه پخ (2ϕ) طبق مقادیر پیشنهادی توسط طراحان انتخاب و پس از محاسبات با تست عملی انژکتور آن را بهینه می‌نمایند، از این رو بهترین انژکتور با مشاهدات در آزمایشگاه به دست می‌آیند [۱۰].
- با انجام این مراحل، انژکتور جریان مستقیم یک پایه مورد نظر بر اساس معلومات جدول (۱) طراحی شد و تغییرات فاکتورهای مهم طراحی برای

که در آن $\dot{m}_{\phi D}$ دبی واقعی انژکتور، μ_ϕ ضریب دبی، F_C سطح مقطع نازل انژکتور، ΔP_ϕ اختلاف فشار دو طرف انژکتور و ρ_* چگالی سیال عامل است.

۲. ضریب دبی انژکتور:

$$\mu_\phi = \frac{\dot{m}_{\phi D}}{\dot{m}_{\phi I}} \quad (2)$$

که در آن $\dot{m}_{\phi I}$ دبی ایده‌آل انژکتور است. مقدار ضریب دبی انژکتور از نسبت دبی عملی خروجی از انژکتور به دبی ایده‌آل خروجی (سطح مقطع پر از سیال) به دست می‌آید که همواره کوچکتر از ۱ است. ضریب دبی در صنعت برای انژکتورهای جریان مستقیم بین ۰/۶۵ تا ۰/۸۵ است. از طرفی مقدار دبی ایده‌آل خروجی از انژکتور برابر با حاصل ضرب سرعت تئوری خروجی سیال (W_T) در چگالی سیال در سطح مقطع نازل انژکتور است.

$$W_T = \sqrt{\frac{2\Delta P_\phi}{\rho_*}} \quad (3)$$

۳. اختلاف فشار بین دو سر انژکتور (ΔP_ϕ) یکی از پارامترهای مهم طراحی است که مقدار آن برای انواع انژکتور متفاوت است.

$$\Delta P_\phi = P_{BX} - P_B \quad (4)$$

در رابطه (۴) P_{BX} فشار سیال در راه ورودی و P_B فشار در سمت خروجی است. این مقدار تعیین‌کننده دبی خروجی از انژکتور است. مقدار اختلاف فشار برای انژکتورهای جریان مستقیم در صنعت بین ۲ تا ۱۵ بار است. به همین ترتیب، مشخصات انژکتور (سرعت خروجی سیال، دبی جرمی جریان، ضریب دبی و زاویه پخ پاشش) تابعی از اختلاف فشار بین دو طرف انژکتور است.

۴. زاویه پخ پاشش ($2\alpha_p$) که تابعی از اختلاف فشار است و مقدار آن برای انژکتورهای جریان مستقیم صنعتی بین ۱۰ تا ۱۲ درجه است.

معادلات اساسی طراحی

انژکتور جریان مستقیم که در نوع خود ساده‌ترین نوع انژکتور می‌باشد، دبی خروجی آن بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود، پس با توجه به معلوم بودن مقادیر اختلاف فشار (ΔP_ϕ)، چگالی سیال (ρ_*) و دبی خروجی (\dot{m}_ϕ) که در هر انژکتور مشخص است، سطح دهانه نازل خروجی از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$F_C = \frac{\dot{m}_\phi}{\mu_\phi \sqrt{2\Delta P_\phi \rho_*}} \quad (5)$$

با توجه به شکل (۱) هر چه قدر طول انژکتور جریان مستقیم (l_c) بیشتر باشد، قطر سیال خروجی از انژکتور (d_*) به قطر نازل (d_c) نزدیک‌تر می‌شود یا به عبارت دیگر مقدار ضریب دبی (μ_ϕ) افزایش پیدا می‌کند. باید در نظر داشت که همواره در عمل، سطح مقطع عبور سیال کمتر از سطح مقطع نازل انژکتور است ($F_C < F_*$) [۱۰].

تنظیمات حل

سطح مشترک بین یک مایع و یک گاز به اصطلاح سطح آزاد^{۱۱} نامیده می‌شود. در پدیده پاشش یک سوخت مایع و پودر شدن آن، مرز بین لایه مایع و هوا یک سطح آزاد است. بنابراین، باید از روش‌های عددی مخصوص بررسی سطح آزاد بین مایع و گاز استفاده کرد. به منظور حل جریان دوفازی و یافتن سطح آزاد بین دو فاز از روش حجم سیال^{۱۲} (VOF) استفاده می‌شود. در روش حجم سیال، اگر نسبت حجمی هر سیال را f_q بنامیم سه حالت مختلف می‌تواند وجود داشته باشد. برای سلول خالی از سیال، سلول پر از سیال و سلول شامل سطح آزاد برای سیال به ترتیب $f_q = 0$ ، $f_q = 1$ و $0 < f_q < 1$ برقرار است. بر اساس این مقدار از f_q ، خواص و پارامترهای مختلف در هر سلول از حوزه حل مشخص می‌شوند. این مدل در واقع یک روش ردیابی سطح^{۱۰} است که به یک شبکه‌بندی ثابت (اولیری) اعمال می‌شود. این روش برای دو یا چند سیال (فاز) مخلوط نشدنی، که فصل مشترک آن‌ها جداگانه است، اعمال می‌شود. دنبال کردن سطح آزاد بین فازهای مختلف صورت می‌پذیرد که در انتها برای هر سلول باید شرط ذیل برقرار باشد [11]:

$$\sum_{q=1}^n f_q = 1 \quad (7)$$

معادلات حاکم (ناویر-استوکس) توسط نرم‌افزار Ansys Fluent 19 حل شدند. در اینجا، اثرات آشفتگی با روش دومعادله‌ای K- ϵ از نوع RNG شبیه‌سازی شد. شرایط مرزی بدین صورت است که درمرز خروجی (محیط اطراف) اختلاف فشار صفر منظور شده است. در ورودی شرط مرزی فشار لحاظ شده است. در دیواره‌ها شرط مرزی دیواره با شرط عدم لغزش به کار رفته است. تحلیل به صورت هم‌دما انجام شده و از معادله انرژی صرف‌نظر شده است. جریان به صورت سه‌بعدی، پایا، آشفتگی و تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شد. برای حل از حل گر فشار-مینا^{۱۱} استفاده شد و معادلات مومنتوم و پیوستگی به طور پی‌درپی حل شدند. برای وابسته کردن میدان سرعت و فشار، الگوریتم سیمپل سی^{۱۲} انتخاب شد. این الگوریتم در بین خانواده روش‌های سیمپل^{۱۳} عملکرد بهتری دارد. برای میانمایی فشار، روش پرستو^{۱۴} بکار گرفته شد، چون استفاده از این روش به پایداری جریان و روند همگرایی آن کمک می‌کند. معادلات مومنتوم، کسر حجمی سیال و معادلات آشفتگی برای دقت بالاتر همگی با روش کوئیک گسسته‌سازی شدند. استقلال از مش‌بندی برای این هندسه بررسی شد و در نهایت نتیجه گرفته شد که تعداد ۱۳۰ هزار سلول محاسباتی در حوزه حل کافی می‌باشد. در واقع با ریز کردن مش از ۱۳۰ تا ۱۸۰ هزار، تغییری در پاسخ حاصل نشد، از اینرو تعداد ۱۳۰ هزار مش در دامنه حل نهایی شد.

بهینه‌سازی در محدوده مجاز توسط طراح انجام شد. در خصوص تعیین مقدار دبی جرمی باید گفت، با توجه به اینکه ضربه ویژه (ایمپالس) هیدرازین و همچنین نیروی پیشران، مشخص هستند، می‌توان مقدار دبی جرمی تزریق سوخت را محاسبه نمود. مقدار دبی جرمی از رابطه (۶) به دست می‌آید [۲]:

$$\dot{m} = \frac{F^{(kg)}}{I_s^{(s)}} \quad (6)$$

با استفاده از رابطه فوق، مقدار دبی جرمی با لحاظ ۱۵٪ حاشیه اطمینان طراحی و ساخت، معادل ۰/۰۰۵۸ kg/s محاسبه شد.

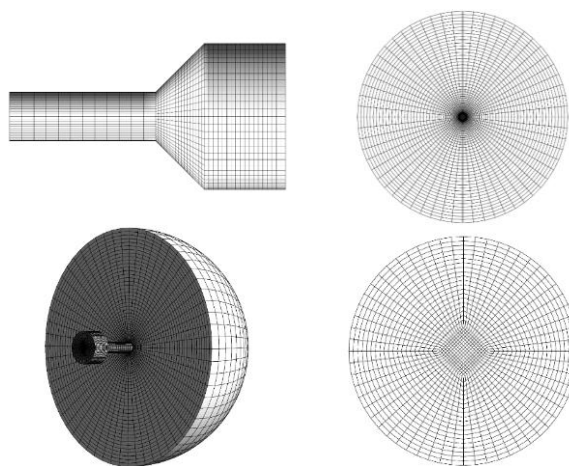
جدول ۱- معلومات طراحی انژکتور

دبی جرمی \dot{m}_p (kg/s)	چگالی سوخت ρ_s (kg/m ³)	ویسکوزیته سینماتیکی مایع ν_s (m ² /sec)	ویسکوزیته دینامیکی مایع μ_s (kg/m.s)
۰/۰۰۵۸	۱۰۲۱	۱/۰۰۱ e-۶	۰/۹ e-۳

شبیه‌سازی و تحلیل تک‌انژکتور کاپیلاری

شبکه‌بندی

شکل (۲) هندسه شبکه‌بندی شده انژکتور را نشان می‌دهد. فضایی به صورت یک نیم‌کره به عنوان فضای تخلیه نازل در نظر گرفته شده است تا اثر پایین دست نیز در مدل لحاظ شده باشد. مرزهای نیم‌کره‌ای که به عنوان فضای بیرون در نظر گرفته شده است، طوری انتخاب شده است که آثار مرزها بر میدان حل ناچیز باشد. مدل‌سازی سه‌بعدی هندسه نازل و شبکه‌بندی آن در نرم‌افزار ورک‌بنچ^۷ انجام گرفته است.



شکل ۲- هندسه شبکه‌بندی شده انژکتور

11. Pressure-based
12. SimpleC
13. Simple
14. Presto

7. Work bench
8. Free surface
9. Volume of fluid
10. Surface-tracking technique

الزام محدوده فشار طراحی انژکتور کاپیلاری را در بر می‌گیرد و هم سرعت متوسط خروجی سیال برابر با ۱۸،۸۷ متر بر ثانیه می‌باشد که سرعت قابل قبولی است.

جدول ۳- پارامترها و نتایج تحلیل پارامتریک انژکتور کاپیلاری

نتایج تحلیل پارامتریک		پارامترها					
سرعت متوسط [m/sec]	دبی جرمی [gr/sec]	طول ورودی / طول انژکتور	زاویه پخ	طول انژکتور / قطر نازل	قطر نازل [mm]	اختلاف فشار [bar]	شماره اجرا
۲۰/۴۶	۵/۶۴	۱	۹۰	۳	۰/۵۵	۴	۱
۱۴/۲۱	۵/۵۹	۱	۹۰	۳	۰/۷	۱/۵	۲
۱۴/۱۹	۵/۵۷	۲	۹۰	۳	۰/۷	۱/۵	۳
۱۴/۴۷	۵/۷	۱	۹۰	۲	۰/۷	۱/۵	۴
۱۶/۴۷	۵/۶۸	۱	۹۰	۲	۰/۶۵	۲	۵
۱۴/۸۴	۵/۸	۱	۹۰	۱	۰/۷	۱/۵	۶
۱۲/۳۳	۵/۸	۱	۹۰	۱	۰/۶۵	۲	۷
۱۲/۲۳	۶/۲	۱	۹۰	۱	۰/۸	۱	۸
۱۱/۷۹	۵/۹	۱	۹۰	۳	۰/۸	۱	۹
۸/۵۶	۵/۹	۱	۹۰	۳	۰/۹۵	۰/۵	۱۰
۱۸/۸۷	۵/۸	۱	۹۰	۳	۰/۶	۳	۱۱

مشخصات هندسی جدول (۳) که با رنگ زرد تعیین شده، به عنوان مشخصات طراحی انژکتور انتخاب گردید و در جدول (۴) نشان داده شده است. این انتخاب با در نظر گرفتن مناسب‌ترین اختلاف فشار دو سر انژکتور، در نظر گرفتن ملاحظات هندسی و ساخت انژکتور، مقدار دبی جرمی که باید توسط این انژکتور تزریق شود و همچنین سرعت متوسط مناسب پاشش سیال از خروجی انژکتور بر روی بستر کاتالیستی صورت گرفته است. شماتیک انژکتور طراحی شده در نرم‌افزار سالیدورک در شکل (۳) ارائه شده است. این انژکتور درون یک میکروروانشگر تک‌مؤلفه‌ای کاتالیستی ۱۰ نیوتنی جانمایی می‌گردد.

جدول ۴- مشخصات هندسی انژکتور طراحی شده

اختلاف فشار [bar]	قطر نازل [mm]	طول انژکتور / قطر نازل	زاویه پخ	طول ورودی / طول انژکتور
۳	۰/۶	۳	۹۰	۱

این بررسی برای یکی از پارامترهای مهم مورد بررسی (سرعت متوسط پاشش در دهانه نازل انژکتور) در جدول ۲ نشان داده شده است. اعتبارسنجی این روش عددی قبلاً برای بررسی و شبیه‌سازی انژکتور گریز از مرکز توسط نویسندگان مقاله در مراجع [۶-۷] انجام شده است.

جدول ۲- بررسی استقلال تحلیل از تعداد مش - جدول سرعت متوسط سوخت در خط شعاعی دهانه نازل تخلیه

ردیف	تعداد المان	سرعت متوسط [m/sec] (V_{mean})
۱	۹۲۳۲۵	۲۰/۴۱
۲	۱۲۹۷۱۹	۲۰/۴۶
۳	۱۵۴۴۳۲	۲۰/۴۶
۴	۱۷۹۶۴۶	۲۰/۴۶

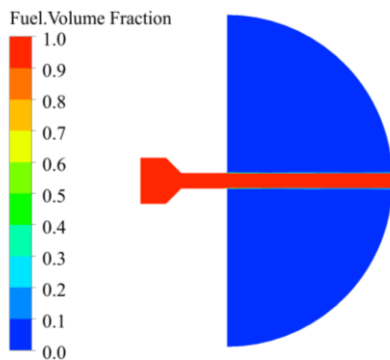
نتایج و تحلیل آنها

به منظور در نظر گرفتن تاثیر پارامترهای هندسی بر خصوصیات جریان خروجی از انژکتور نظیر ضخامت لایه سیال خارج شده، دبی جرمی در اختلاف فشار معین دو سر انژکتور و سرعت متوسط سیال خروجی، تحلیل جریان داخلی انژکتور به کمک نرم‌افزار فلوئنت انجام گرفت. سیال بعد از عبور از ورودی و قسمت همگرای انژکتور، از نازل انژکتور خارج می‌شود. در این قسمت پارامتر فشار و پارامترهای هندسی و تاثیر آنها بر روی سرعت خروجی و دبی جرمی انژکتور مورد بررسی قرار می‌گیرد.

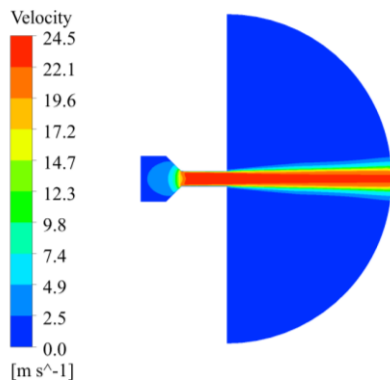
در مرحله تحلیل، تعدادی اجرا گرفته شد و در این اجراها با تغییر فشار ورودی انژکتور حول مقادیری که از طراحی بدست آمد، مشخصه‌های مورد نظر انژکتور از جمله دبی جرمی و سرعت متوسط در دهانه نازل خروجی انژکتور محاسبه گردید. این نتایج در جدول (۳) نشان داده شده است. بر اساس این اجراها، بهترین نتیجه از اجرای شماره ۱۱ بدست آمد که با رنگ زرد در جدول نشان داده شده است. این مشخصات هندسی به عنوان مشخصات طراحی انژکتور انتخاب گردید. علت این مطالعه دست‌یابی به سرعت سیال خروجی پایین‌تر از انژکتور است. زیرا زیاد بودن سرعت سیال خروجی از انژکتور موجب آسیب رسیدن به گرانول‌های کاتالیستی می‌گردد. به همین دلیل بایستی تا حد امکان سرعت سیال خروجی از انژکتور کاهش یابد. سرعت سیال خروجی ارتباط مستقیم با اختلاف فشار دو طرف انژکتور دارد ولی همان‌طور که قبلاً بیان شد، محدوده اختلاف فشار دو طرف انژکتورهای کاپیلاری در صنعت ۲-۱۵ بار است. به همین دلیل اختلاف فشار ۳ بار برای طراحی نهایی انژکتور انتخاب گردید که هم

شبیه‌سازی و تحلیل صفحه انژکتور سه سوراخه شبکه‌بندی

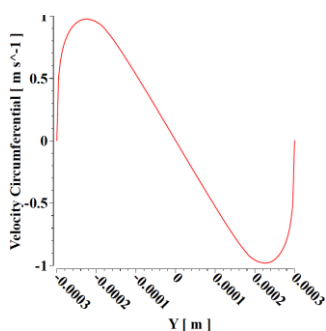
پیشنهاد دیگر استفاده از صفحه انژکتور به جای انژکتور تک است. به همین منظور از یک صفحه انژکتور سه سوراخه برای پاشش سوخت استفاده می‌شود. شکل (۸) هندسه شبکه‌بندی شده صفحه انژکتور را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود آرایش انژکتورها به صورت مثلثی انتخاب گردید که علت این امر یکنواختی پاشش سوخت در محفظه است.



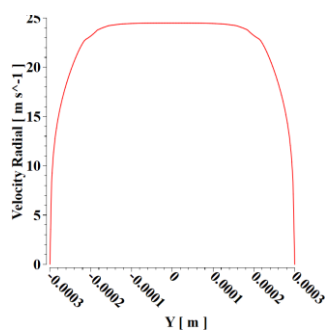
شکل ۴- کانتور کسر حجمی سوخت



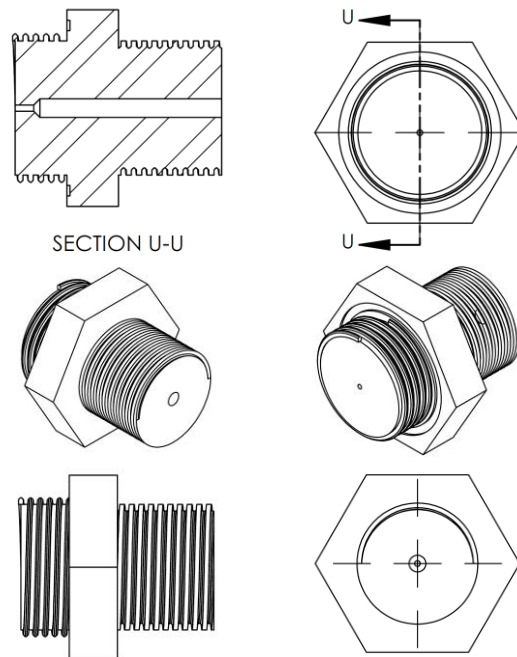
شکل ۵- کانتور اندازه سرعت



شکل ۷- توزیع سرعت شعاعی و محیطی در دهانه خروجی انژکتور



شکل ۶- توزیع سرعت در دهانه خروجی انژکتور

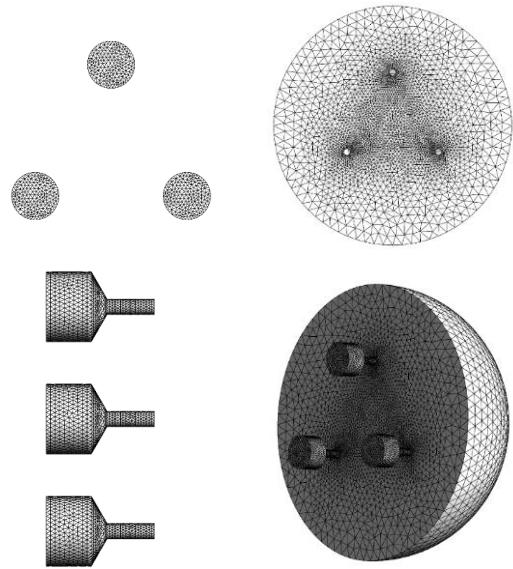


شکل ۳- شماتیک انژکتور طراحی شده

شکل (۴) کانتور کسر حجمی سوخت را نشان می‌دهد. کسر حجمی، یک پارامتر مهم در ارزیابی جریانات دوفازی محسوب می‌شود زیرا نماینگر این است که سطح مشترک دو فاز مختلف (مایع و گاز) در کجا شکل گرفته است. این پارامتر یک مقدار بدون بعد است که میزان آن از صفر تا یک متغیر است. رنگ قرمز به منزله سلول پر از سوخت و رنگ آبی به منزله سلول خالی از سوخت است. در شکل (۵) کانتور اندازه سرعت نشان داده شده است. در انژکتور جریان مستقیم، بیشتر سیال خروجی از نازل انژکتور با بیشینه سرعت از نازل خارج می‌شود و تنها در نزدیک دیواره سرعت نزدیک به صفر است. این مطلب در شکل (۶) که نشان دهنده توزیع سرعت در دهانه خروجی انژکتور است، کاملاً قابل مشاهده است. در شکل (۷) نیز توزیع سرعت شعاعی و محیطی در دهانه خروجی انژکتور مشاهده می‌شود. میانگین اندازه سرعت سیال در خروجی نازل معادل $18/87$ متر بر ثانیه و دبی جرمی سوخت برابر $0/058$ کیلوگرم بر ثانیه بدست آمد. بر اساس شکل ۵ زاویه پاشش در حدود 10 درجه است که مطابق با محدوده طراحی انژکتورهای جریان مستقیم می‌باشد.

جدول ۵- پارامترها و نتایج تحلیل پارامتریک برای صفحه انژکتور سه سوراخه

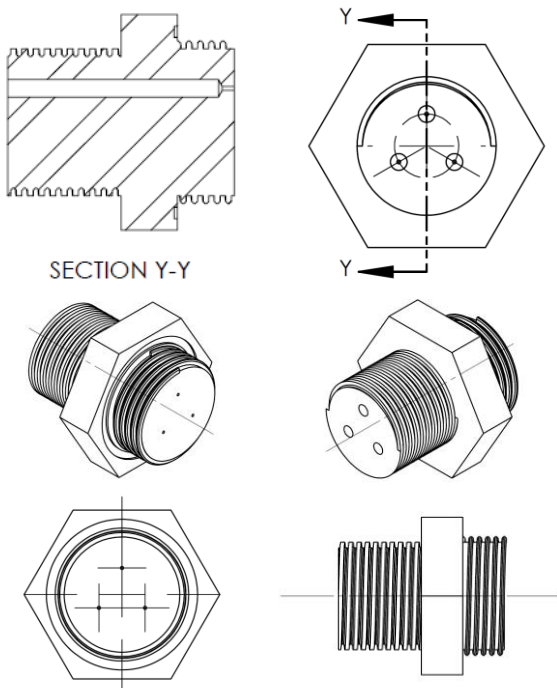
نتایج تحلیل پارامتریک		پارامترها					
شماره اجرا	اختلاف فشار [bar]	قطر نازل [mm]	طول انژکتور قطر نازل	زاویه پخ	طول ورودی طول انژکتور	دبی جرمی [gr/sec]	سرعت متوسط [m/sec]
۱	۴	۰/۵	۲	۹۰	۱	۱۵	۲۰/۰۵
۲	۲	۰/۲	۲	۹۰	۱	۱/۶	۱۴/۵۷
۳	۲	۰/۵	۲	۹۰	۱	۱۰	۱۶/۱۲
۴	۲	۰/۴	۲	۹۰	۱	۶/۷	۱۶/۶۶
۵	۳	۰/۳	۲	۹۰	۱	۴/۶	۱۷/۷۲
۶	۳	۰/۴	۲	۹۰	۱	۸/۲	۱۹/۰۱
۷	۳	۰/۳۵	۲	۹۰	۱	۶/۲	۱۸/۶۵
۸	۳	۰/۳۵	۳	۹۰	۱	۶/۱	۱۸/۱۸
۹	۳	۰/۳۵	۳	۹۰	۲	۶/۱	۱۸/۰۱
۱۰	۳	۰/۳۵	۳	۱۲۰	۱	۵/۹	۱۸/۵۷



شکل ۸- هندسه شبکه بندی شده صفحه انژکتور

جدول ۶- مشخصات هندسی صفحه انژکتور طراحی شده

اختلاف فشار [bar]	قطر نازل [mm]	طول انژکتور قطر نازل	زاویه پخ	طول ورودی طول انژکتور
۳	۰/۳۵	۳	۱۲۰	۱

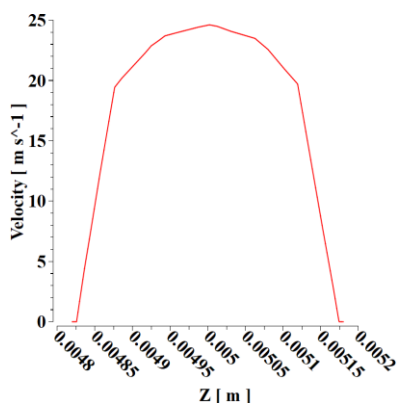


شکل ۹- شماتیک صفحه انژکتور طراحی شده

نتایج و تحلیل

تمام پارامترهای تحلیل انژکتور تک برای صفحه انژکتور نیز بررسی می شود، به همین منظور مشخصه های مورد نظر صفحه انژکتور از جمله دبی جرمی و سرعت متوسط در دهانه نازل خروجی هر انژکتور آن محاسبه می گردد. این نتایج در جدول (۵) نشان داده شده است. بر اساس این اجزای، بهترین نتیجه، از اجرای شماره ۱۰ بدست آمد که با رنگ زرد در جدول نشان داده شده است. این مشخصات هندسی به عنوان مشخصات طراحی صفحه انژکتور سه سوراخه انتخاب گردید. این انتخاب با در نظر گرفتن مناسب ترین اختلاف فشار دو سر صفحه انژکتور، در نظر گرفتن ملاحظات هندسی و ساخت صفحه انژکتور، مقدار دبی جرمی که باید توسط این صفحه انژکتور تزریق شود و همچنین سرعت متوسط مناسب پاشش سیال از خروجی نازل های صفحه انژکتور بر روی بستر کاتالیستی صورت گرفته است.

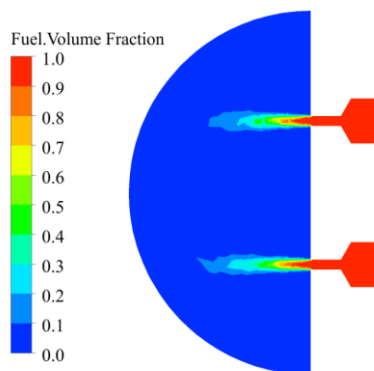
همان طور که مشاهده می شود چون از صفحه انژکتور سه سوراخه استفاده شده است، جهت تأمین دبی مورد نظر انژکتور، قطر هر یک از انژکتورها نسبت به انژکتور تک کاهش می یابد. مشخصات هندسی که با رنگ زرد تعیین شده، به عنوان مشخصات طراحی صفحه انژکتور انتخاب شد که در جدول (۶) نشان داده شده است. شماتیک صفحه انژکتور طراحی شده در نرم افزار سالیدورک^{۱۵} در شکل (۹) ارائه شده است. این صفحه انژکتور درون یک میکرورانسگر تک پیشرانه کاتالیستی ۱۰ نیوتنی جانمایی خواهد شد.



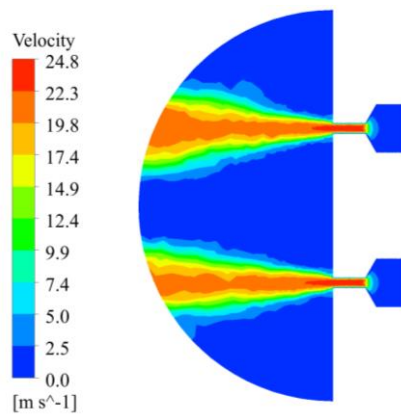
شکل ۱۲- توزیع سرعت در دهانه خروجی انژکتورهای صفحه انژکتور

هدف اصلی این پژوهش، طراحی انژکتور و صفحه انژکتوری بود که دبی جرمی مورد نیاز میکروانشر ۱۰ نیوتنی را تأمین کند و پوشش دهی خوبی روی بستر کاتالیستی داشته باشد، تا بتواند جایگزین انژکتور جریان پیچشی برای میکروانشر ۱۰ نیوتنی تک‌مؤلفه‌ای کاتالیستی موجود، شود. زیرا با توجه به محدودیت وزن میکروانشر و مصرف کاتالیست گران قیمت ایریدیومی، ترجیح بر این بود که محفظه کاتالیستی و بالتبع، ابعاد میکروانشر کوچکتر شود که با جایگزینی انژکتور کاپیلاری، این هدف میسر گردید. لازم به ذکر است استفاده از صفحه انژکتور به جای تک‌انژکتور نیز مزایا و معایبی دارد. یکی از مزیت‌های مهم آن پاشش بهتر سوخت بر بستر کاتالیستی می‌باشد. هرچه قطر محفظه احتراق بیشتر باشد، استفاده از صفحه انژکتور ارجحیت دارد. در میکروموتورهای در بازه عملکردی ۱۰ نیوتن، استفاده از انژکتور تک کاربرد بیشتری دارد زیرا انژکتور به تنهایی کل بستر کاتالیستی را می‌تواند پوشش دهد. یکی از معایب استفاده از صفحه انژکتور به جای انژکتور، مشکلات ساخت آن (در داخل کشور) می‌باشد. علت این امر کوچک‌تر بودن قطر نازل صفحه انژکتور نسبت به انژکتور تک می‌باشد. همان‌طور که بیان گردید استفاده از صفحه انژکتور به منظور پاشش یکنواخت هیدرازین در کل محفظه کاتالیستی می‌باشد از سویی دیگر در این پژوهش دبی جرمی انژکتور پایین و در حدود ۵ گرم بر ثانیه می‌باشد که در صفحه انژکتور همین مقدار دبی جرمی نیز بین انژکتورها تقسیم می‌شود. دبی جرمی خروجی از انژکتور رابطه مستقیمی با قطر نازل آن دارد و با کاهش دبی جرمی، قطر نازل نیز کاهش می‌یابد. به همین دلیل با افزایش تعداد سوراخ‌های انژکتور، ابعاد هر یک از آن‌ها بسیار کوچک می‌شود. بر همین اساس با انتخاب تعداد بیشتر از سه انژکتور برای صفحه انژکتور، ابعاد نازل انژکتورها بسیار ریز شده (در حدود کمتر از ۰,۳۵ میلی‌متر) و بر اساس تکنولوژی حال حاضر قابلیت ساخت ندارد. بنابر دلایل ذکر شده برای طراحی میکروانشر ۱۰ نیوتنی، انژکتور تک به عنوان طرح نهایی انتخاب گردید و استفاده از صفحه انژکتور به عنوان طرح دوم تعیین شد.

شکل (۱۰) کانتور کسر حجمی سوخت در صفحه انژکتور را نشان می‌دهد. لازم به یادآوری است که رنگ قرمز به‌منزله سلول پر از سوخت و رنگ آبی به‌منزله سلول خالی از سوخت است. شکل (۱۱) کانتور اندازه سرعت صفحه انژکتور را نشان می‌دهد. در انژکتور جریان مستقیم، عمده سیال خروجی از نازل انژکتور با بیشینه سرعت از نازل خارج می‌شود و تنها در نزدیک دیواره سرعت نزدیک به صفر است. این مطلب در شکل (۱۲) که نشان دهنده توزیع سرعت در دهانه خروجی نازل‌های صفحه انژکتور می‌باشد، کاملاً قابل ملاحظه است. میانگین اندازه سرعت سیال در خروجی نازل هر انژکتور معادل ۱۸,۵۷ متر بر ثانیه و دبی جرمی سوخت نیز از این تحلیل برابر ۰,۰۰۵۹ کیلوگرم بر ثانیه بدست آمد. با بررسی نتایج، این اطمینان حاصل شد که انژکتور و صفحه انژکتور طراحی شده، دبی جرمی مورد نظر را در اختلاف فشار معین طراحی می‌تواند تأمین کنند. از اینرو این ابعاد به عنوان ابعاد نهایی برای ساخت و استفاده در میکروانشر تک‌مؤلفه ۱۰ نیوتنی انتخاب شدند. پس از ساخت، باید تست‌های تجربی ماکروسکوپی و میکروسکوپی برای بررسی تقارن پاشش و تعیین سایر مشخصه‌های اسپری نظیر طول شکست و در صورت امکان سایز قطرات بر روی آن‌ها انجام گیرد.



شکل ۱۰- کانتور کسر حجمی سوخت صفحه انژکتور



شکل ۱۱- کانتور اندازه سرعت صفحه انژکتور

نتیجه گیری

در این مقاله، روند طراحی و شبیه سازی تک انژکتور کاپیلاری و صفحه انژکتور سه سوراخه یک میکرورانشر تک مؤلفه ای هیدرازینی ۱۰ نیوتنی ارائه شد. هدف اصلی این پژوهش دستیابی به دبی جرمی مورد نیاز تزریق میکرورانشر است. مقدار این دبی جرمی برای طراحی و شبیه سازی انژکتور برای طراحی و شبیه سازی انژکتور برابر با $0/0058$ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شد. به منظور دست یابی به این مقدار دبی جرمی، مشخصات مختلف هندسی انژکتور و همچنین اختلاف فشار دو طرف انژکتور مورد بررسی قرار گرفت و مقدار بهینه آن ها انتخاب گردید. نتایج نهایی حاصل از طراحی و شبیه سازی انژکتور کاپیلاری تک و صفحه انژکتور به تفکیک در بدنه مقاله بیان شده اند. مشخصات هندسی و اختلاف فشار دو طرف انژکتور به گونه ای طراحی و انتخاب شدند تا مشخصه های مناسب برای استفاده در این کاربری خاص را تأمین کنند. با در نظر گرفتن این نکته که بررسی تجربی مشخصه های انژکتور به دلیل ابعاد کوچک آن سخت است و همچنین هزینه بالای انجام آزمون های تجربی، طراحی و شبیه سازی عددی ضرورت دارد. به همین دلیل بایستی طرح های مختلف ابتدا توسط شبیه سازی بررسی شده و سپس طرح نهایی با آزمون های تجربی صحت گذاری شود. در نسخه قبلی این میکرورانشر ۱۰ نیوتنی، از انژکتور جریان پیچشی با پاشش چتری توخالی استفاده شده بود. اما در طرح جدید با انژکتور کاپیلاری به دلیل چتر کوچک و توپر انژکتور، طراح محفظه کاتالیستی قادر است تا ابعاد محفظه را به اندازه چشمگیری کاهش دهد که هم حجم کاتالیست مصرفی گران قیمت ایریدیوم کاهش می یابد و هم بالتبع ابعاد و وزن میکرورانشر کاهش می یابد. چرا که هدف اصلی این پژوهش، طراحی انژکتور و صفحه انژکتوری بود که دبی جرمی مورد نیاز میکرورانشر ۱۰ نیوتنی را تأمین کند و پوشش دهی خوبی روی بستر کاتالیستی داشته باشد تا بتواند جایگزین انژکتور جریان پیچشی برای میکرورانشر ۱۰ نیوتنی تک مؤلفه ای کاتالیستی موجود، شود. در واقع با توجه به محدودیت وزن میکرورانشر و مصرف کاتالیست گران قیمت ایریدیومی، ترجیح بر این بود که محفظه کاتالیستی و ابعاد میکرورانشر کوچکتر شوند که با جایگزینی انژکتور کاپیلاری، این مهم میسر گردید. همان طور که بیان شد دو طرح تک انژکتور و صفحه انژکتور در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت که در نهایت تک انژکتور کاپیلاری به عنوان طرح نهایی انتخاب گردید که علت های این انتخاب بر این اساس است که در میکروموتورهای در بازه عملکردی ۱۰ نیوتن، استفاده از انژکتور تک کاربرد بیشتری دارد زیرا انژکتور به تنهایی کل بستر کاتالیستی را می تواند پوشش دهد و همچنین به دلیل ریز شدن سوراخ های نازل خروجی صفحه انژکتور (تقریباً $0/35$ میلی متر)، تکنولوژی ساخت آن در داخل کشور مشکلاتی را به همراه دارد.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1] Shankar V, Ram KA, Bhaskaran KA. Prediction of the concentration of hydrazine decomposition products along a granular catalytic bed. *Acta Astronaut* 1984;11:287-99. [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(84\)90038-9](https://doi.org/10.1016/0094-5765(84)90038-9).
- [2] Shankar V, Anantha Ram K, Bhaskaran KA. Experimental investigations of the 10 N catalytic hydrazine thruster. *Acta Astronaut* 1985;12:237-49. [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(85\)90038-4](https://doi.org/10.1016/0094-5765(85)90038-4).
- [3] Hinckel JN, Jorge JAR, Neto TGS, Zacharias MA, Palandi JAL. Low cost catalysts for hydrazine monopropellant thrusters. 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Jt Propuls Conf Exhib 2009. <https://doi.org/10.2514/6.2009-5232>.
- [4] Nada TR, Hashem AA. Geometrical characterization and performance optimization of monopropellant thruster injector. *Egypt J Remote Sens Sp Sci* 2012;15:161-9. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2012.09.001>.
- [5] Franken T, Valencia-Bel F, Jyoti BVS, Zandbergen B. Design of a 1-N monopropellant thruster for testing of new hydrogen peroxide decomposition technologies. *Aerosp Eur Conf* 2020; Fr 25-28 Febr 2020 2020.
- [6] Hosseinalipour SM, Karimaei H, Movahednejad E, Ommi F. Application of maximum entropy principle for estimation of droplet-size distribution using internal flow analysis of a swirl injector. *Int J Spray Combust Dyn* 2016;8:205-16. <https://doi.org/10.1177/1756827716654647>.
- [7] Hosseinalipour SM, Karimaei H. A new model based on coupling of MEP/CFD/ILIA for prediction of primary atomization. *Can J Chem Eng* 2016;94:792-802. <https://doi.org/10.1002/cjce.22447>.
- [8] H. Karimaei, "Design and Simulation of Fuel Injector of a 10N Monopropellant Hydrazine Thruster" *Space Science and Technology*, vol. 13, no. 3, pp.9-19, 2018 (in Persian).
- [9] H. Karimaei, M. R. Salimi, H. Naseh, E. Jokari, Design of Physical Configuratin of 10N Monopropellant Hydrazine Thruster, *Space Science and Technology*, vol. 12. no. 1, pp. 13-22, 2019 (in Persian).
- [10] F. Ommi, *Principles of Engine Design and Advances Space Propulsion*, Publications of Tarbiat Modares University, Tehran: Iran, 2017 (in Persian).
- [11] Ansys-Fluent Software Version 19, *Fluent's User's Guide* 2019.