



Journal of
Space Science, Technology
& Applications (Persian)

Vol. 1, No. 2, pp.: 97-111
2022

Available in:
Journal.isrc.ac.ir/article_146836.html

DOI:
10.22034/jsssta.2022.323058.1044

Article Info

Received: 2022-1-4
Accepted: 2022-2-14

Keywords

Fluid layer;
Monopropellant thruster;
Spray cone; Injector
internal geometry;
Pressure-swirl injector

How to cite this article

Hadiseh Karimaei,
“Design and Analysis of
Pressure- Swirl Fuel
Injector with Full- Cone
Spray for Catalytic
Thruster”, *Journal of Space
Science, Technology and
Applications*, vol 1 (2), p.:
97-111, 2022.

Original Article

Design and Analysis of Pressure- Swirl Fuel Injector with Full- Cone Spray for Catalytic Thruster

Hadiseh Karimaei ^{*,1}

1,*. Ari, karimaei@ari.ac.ir, Corresponding author

Abstract

The monopropellant thrusters of the situation control system are a requirement for the development and application of satellites and space capsules in space, which are high-tech and expensive. In this paper, the design and simulation of a pressure- swirl injector with full-cone spray as a fuel injector of a monopropellant thruster are presented. For this injector, internal flow simulation was performed in order to predict its output flow characteristics including spray cone angle, output velocity distribution, mass flow rate, spray pattern, etc. For this purpose, VOF fluid volume method is used and the flow turbulence is simulated using the k-eps model. This type of injector is actually a combination of straight flow injector and swirl flow injector. Jet straight flow in the center of the injector and swirl flow along the injector wall are flowed. Both flow regimes are combined in the swirl chamber and the spray is formed as a full-cone. If the ratio of the outlets is selected correctly, the radial and environmental distribution of the liquid jet will be uniform. This injector is preferred to the capillary type (straight flow) and the swirl type. The pressure-swirl injector spray angle is larger than the capillary type, which improves the coverage of the catalyst bed, at the same time, spray angle is not as large as the swirl injector, which enlarges the radial dimensions of the decomposition chamber. Based on the results, it was ensured that the injector provides the desired mass flow rate (about 5.8 gr/s) at a certain design pressure difference (3 bar) and determines a suitable spray pattern. It also provides the desired spray angle (about 35°).

طراحی و تحلیل انژکتور سوخت پاش فشاری-پیچشی با اسپری توپر برای رانشگر کاتالیستی

حدیثه کریمایی^{*۱}

۱. *. استادیار، گروه علوم فضایی، پژوهشگاه هوافضا، karimaei@ari.ac.ir (نویسنده مسئول)



دو فصلنامه

علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال اول، شماره ۲، صفحه ۹۷-۱۱۱
پاییز و زمستان ۱۴۰۰

دسترس پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir/article_146836.html

DOI:
10.22034/jsssta.2022.323058.1044

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۴
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵

واژه‌های کلیدی

لایه سیال، رانشگر تک مولفه‌ای،
مخروط اسپری، هندسه داخلی
انژکتور، انژکتور فشاری-پیچشی.

نحوه استناد به این مقاله

حدیثه کریمایی، "طراحی و تحلیل
انژکتور سوخت پاش فشاری-پیچشی
با اسپری توپر برای رانشگر
کاتالیستی"، دو فصلنامه علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی، جلد اول، شماره
دوم، صفحات ۹۷-۱۱۱، ۱۴۰۰.

چکیده

رانشگرهای تک مولفه‌ای سیستم کنترل وضعیت، یک نیاز برای توسعه و کاربردی سازی ماهواره‌ها و کپسول‌های فضایی هستند که از فناوری بالا و گران قیمتی نیز برخوردارند. در این مقاله، طراحی و محاسبات یک انژکتور فشاری-پیچشی با اسپری مخروطی توپر به عنوان انژکتور سوخت یک رانشگر تک مولفه‌ای کم پیشران، ارائه شده است. برای این انژکتور، شبیه سازی جریان داخلی به منظور پیش بینی مشخصه های جریان خروجی آن شامل زاویه مخروط پاشش، توزیع سرعت خروجی، دبی جرمی، الگوی پاشش و غیره انجام گرفته است. بدین منظور، از روش حجم سیال VOF استفاده شده و آشفتگی جریان نیز با استفاده از مدل k-ε شبیه سازی شده است. این نوع انژکتور، در واقع ترکیبی از انژکتور جریان مستقیم و انژکتور گریز از مرکز است. جریان مستقیم در مرکز انژکتور و جریان پیچشی در کنار دیواره انژکتور جریان دارد. اگر نسبت دهانه های خروجی به درستی انتخاب شود، توزیع شعاعی و محیطی جت مایع یکنواخت می شود. این انژکتور برای سامانه های کم پیشران نسبت به نوع کاپیلاری (جریان مستقیم) و جریان پیچشی ارجحیت دارد. زیرا هم چتر پاشش مخروطی توپر و بزرگتری نسبت به نوع جریان مستقیم دارد که پوشش دهی کاتالیست را بهتر می کند، در عین حال چتر پاششی که ایجاد می کند به بزرگی انژکتور جریان پیچشی نیست که ابعاد شعاعی محفظه را بزرگ کند. با بررسی نتایج، این اطمینان حاصل شد که انژکتور طراحی شده، دبی جرمی مورد نظر (حدود ۵/۸ گرم بر ثانیه) را در اختلاف فشار معین طراحی (۳ بار نسبی) تامین می کند و الگوی پاشش مناسبی رقم می زند. همچنین زاویه پاشش مورد نظر (حدود ۳۵ درجه) نیز توسط آن تامین می شود.

۱- مقدمه

میکرورانشگرهای تک مولفه‌ای، بهترین گزینه برای تصحیح و انتقال مداری ماهواره‌ها هستند. به همین منظور، آن‌ها به طور گسترده‌ای در سفینه‌های فضایی برای ماموریت‌های مختلف استفاده می‌شوند. ماهواره‌ها برای اهداف مختلفی از قبیل تزریق ماهواره به مدار ماموریت، جبران نیروی کششی، افزایش و کاهش سرعت ماهواره و کنترل سه محور نیاز به میکرورانشگرها دارند. هیدرازین، به عنوان پرمصرف ترین سوخت میکرورانشگرها شناخته می‌شود. ضربه ویژه (Isp) هیدرازین حدود ۲۰٪ بیشتر از پراکسید هیدروژن است. میکرورانشگرهای تک مولفه‌ای هیدرازینی به دلیل قابلیت راه اندازی مجدد نامحدود و قابلیت اطمینان بالا، کاربرد زیادی دارند [1,2]. انژکتور یکی از عناصر اصلی میکرورانشگر است و عملکرد میکرورانشگر تحت تاثیر آن است. عملکرد اصلی انژکتور، پاشش مناسب سوخت و در نتیجه جذب آن در گرانول‌های کاتالیزور است. پاشش سوخت در میکرورانشگرها باید تمام سطح مقطع بستر را بپوشاند تا کارایی تجزیه افزایش یابد. یکی از مهمترین عوامل به منظور بهبود تجزیه هیدرازین در میکرورانشگرها، توزیع مناسب و یکنواخت اندازه قطرات هیدرازین در محفظه تجزیه است [3].

شانکار^۱ و همکاران [4,5] یک میکرورانشگر هیدرازینی ۱۰ نیوتنی را بررسی کردند. انژکتور استفاده شده توسط آن‌ها از نوع انژکتور کاپیلاری^۲ یا جریان مستقیم^۳ بود. این نوع انژکتور ساده‌ترین نوع انژکتور است و به دلیل سادگی ساخت، به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از نقاط ضعف انژکتورهای جریان مستقیم، زاویه پاشش کوچک آن‌ها است که موجب می‌شود انژکتور کل محفظه تجزیه را پوشش ندهد. هینکل^۴ و همکاران [6]، یک میکرورانشگر هیدرازینی ۳۵ نیوتنی را مطالعه کردند. آن‌ها برای سیستم پاشش سوخت از یک صفحه انژکتور کاپیلاری هفت سوراخه برای پاشش هیدرازین استفاده کردند. آرایش صفحه انژکتور به این صورت است که یک انژکتور در وسط و بقیه انژکتورها در اطراف قرار دارند. بر اساس مطالعات آن‌ها، پاشش هیدرازین به داخل محفظه تجزیه به خوبی صورت

گرفته و مشخصه‌های مورد نیاز میکرورانشگر توسط این صفحه انژکتور تامین می‌شود. فرانکن^۵ و همکاران [7] یک رانشگر ۱ نیوتنی با سوخت آب اکسیژنه را بررسی کردند. آن‌ها در این طراحی به منظور پاشش آب اکسیژنه به داخل محفظه کاتالیستی از انژکتور کاپیلاری استفاده کردند.

حسینعلی‌پور و همکاران [8,9]، جریان داخلی انژکتورهای مختلف را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که توزیع مناسب پاشش انژکتور به هندسه داخلی آن وابسته است. کریمائی [10] یک انژکتور گریز از مرکز را با دو ورودی مماسی به عنوان انژکتور یک میکرورانشگر تک مولفه‌ای هیدرازینی ۱۰ نیوتنی را طراحی و شبیه‌سازی 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 نیاز میکرورانشگر (۵ گرم بر ثانیه) در اختلاف فشار معین طراحی توسط انژکتور تامین می‌شود و حفره هوا داخل انژکتور تا انتهای آن تشکیل می‌شود. کریمائی و همکاران [11] برای طراحی میکرورانشگر تک مولفه‌ای 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 تامین دبی جرمی مورد نیاز میکرورانشگر را دارد.

عبدالحمید^۶ و همکاران [12] در یک مطالعه تجربی از انژکتور فشاری-پیچشی^۷ برای پاشش سوخت در محفظه تجزیه یک میکرورانشگر استفاده کردند. آن‌ها پارامترهای هندسی مختلف انژکتور را در فشارهای مختلف مورد بررسی قرار داده و بهینه‌ترین حالت را معرفی نمودند. نادا^۸ و همکاران [13] تاثیر استفاده از انژکتورهای مختلف را بر روی عملکرد یک میکرورانشگر هیدرازینی بررسی کردند. به همین منظور، آن‌ها دو نوع انژکتور شامل یک انژکتور جریان مستقیم و دیگری انژکتور فشاری-پیچشی را مطالعه کردند. به منظور بهینه‌سازی پارامترهای هندسی انژکتور، نمودارهای طراحی انژکتور توسط آن‌ها معرفی شد. آن‌ها بیان کردند که انژکتور فشاری-پیچشی

5 Franken
6 Hamid AHA
7 Pressure swirl injector
8 Nada

1 Shankar
2 Capillary
3 Straight Injection
4 Hinckel

پژوهش حاضر، طراحی و شبیه‌سازی صفحه انژکتور جریان مستقیم مورد بررسی قرار می‌گیرند و نتایج مشخصه‌های مورد نیاز ارائه می‌شود. طراحی این انژکتور برای یک تراستر تک مولفه‌ای ساخته شده با هدف بومی‌سازی در ایران انجام شده است که قبلاً انژکتور آن از نوع جریان پیچشی ساخته شده بود.

۲- اصول طراحی انژکتور فشاری - پیچشی

پارامترهای اساسی طراحی انژکتور شامل موارد زیر است که عملکرد بهینه انژکتور توسط آن‌ها تعیین می‌شود. این پارامترها عبارتند از [15]:

۱. دبی خروجی از انژکتور:

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

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) به‌دست می‌آید که همواره کوچکتر از ۱ 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.

$$W_T = \sqrt{\frac{2 \Delta p_{\phi}}{\rho^*}} \quad (3)$$

گزینه مناسب‌تری برای رانشگرهای تک‌پایه است ولی در عین حال، روش ساخت پیچیده‌تری دارد. انژکتورهای فشاری-پیچشی، مزایای انژکتور جریان مستقیم و انژکتور گریز از مرکز را با هم دارند به این صورت که زاویه پاشش مناسب بوده و چتر پاشش نیز توپر است که برای پاشش در محفظه‌های تجزیه میکروموتورها بسیار مناسب است. علاوه بر این، دبی جرمی قسمت مرکزی انژکتور با چتر پاشش توخالی برابر با صفر است که موجب می‌شود پاشش هیدرازین در محفظه به صورت یکنواخت صورت نگرفته و قسمت مرکزی محفظه را شامل نشود ولی با این نوع انژکتور قسمت مرکزی بستر نیز خوب پوشش‌دهی می‌شود [14].

در این مقاله، روند طراحی انژکتور سوخت یک میکرورانشگر تک‌مولفه‌ای کاتالیستی هیدرازینی ۱۰ نیوتنی ارائه شده است. این انژکتور از نوع انژکتور فشاری-پیچشی است. انژکتور فشاری-پیچشی، ترکیبی از انژکتور جریان مستقیم و انژکتور گریز از مرکز است. جریان مستقیم در مرکز انژکتور و جریان پیچشی در کنار دیواره انژکتور جریان دارد. هر دو رژیم جریان در محفظه چرخش با یکدیگر ترکیب شده و چتر پاشش به صورت مخروطی توپر در نازل تخلیه انژکتور تشکیل می‌شود. اگر نسبت دهانه‌های خروجی به درستی انتخاب شود، توزیع شعاعی و محیطی جت مایع یکنواخت می‌شود. انژکتورهای فشار متوسط فشاری-پیچشی با ایجاد اسپری به صورت مخروط توپر برای اسپری سیال‌های مختلف در بسیاری از صنایع کاربرد دارد. افزایش سطح موثر تماس قطرات با گاز محیط موجب افزایش نرخ انتقال حرارت و بهبود اختلاط و تبخیر می‌شود. در این پژوهش، ابتدا مدل‌سازی و سپس تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی برای انژکتور انجام شد و مشخصه‌های لایه سیال خروجی از آن استخراج شد. هدف از مدل‌سازی جریان داخلی انژکتور در مقاله حاضر، اطمینان از تامین مشخصه‌های مورد نیاز است. در تکرارهای طراحی^۱ 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. سپس در ادامه

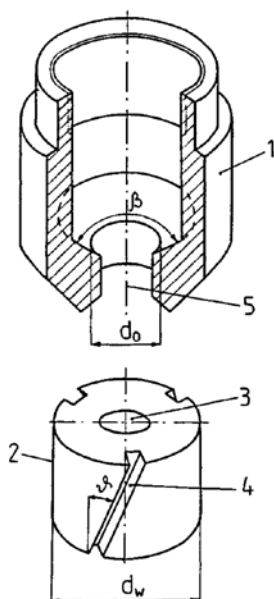
جدول ۱. تعیین قطر بخش پیچشی d_w بسته به قطر دهانه نازل

[3] خروجی d_0

d_0 [mm]	< ۲	۱۵-۲	> ۱۵
d_w [mm]	۱۵	۳۰	d_0 ۲

جدول ۲. زاویه شیب شیار بر حسب زاویه پاشش [3]

α [deg]	۳۰	۵۰-۳۰	۷۵-۵۰	> ۷۵
v [deg]	۱۰	۱۵	۲۵	۳۰



شکل ۱. انژکتور فشاری- پیچشی. ۱- بدنه، ۲- بخش پیچشی

جریان، ۳- دهانه ورودی محوری، ۴- شیارها، ۵- دهانه نازل [3]

همان‌طور که بیان شد، چتر پاشش ایجاد شده توسط انژکتور فشاری- پیچشی به صورت توپر است. بر همین مبنا، این انژکتور گزینه مناسبی برای سیستم پاشش سوخت در میکرو رانشگرهای تک‌مولفه‌ای است زیرا چتر پاشش توپر تمام محفظه تجزیه را در گرفته و موجب افزایش تجزیه هیدرازین می‌شود. بر همین اساس، انژکتور فشاری- پیچشی از نوع بخش پیچشی جریان استوانه‌ای برای سامانه پاشش میکرو رانشگر تک‌مولفه‌ای ۱۰ نیوتنی انتخاب شد. تعداد شیارهای بخش پیچشی جریان انژکتور

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 راهه ورودی و P_B فشار در سمت خروجی است. این مقدار تعیین‌کننده دبی خروجی از انژکتور است. به همین ترتیب، مشخصات انژکتور (سرعت خروجی سیال، دبی جرمی جریان، ضریب دبی و زاویه چتر پاشش) تابعی از اختلاف فشار بین دو طرف انژکتور است.

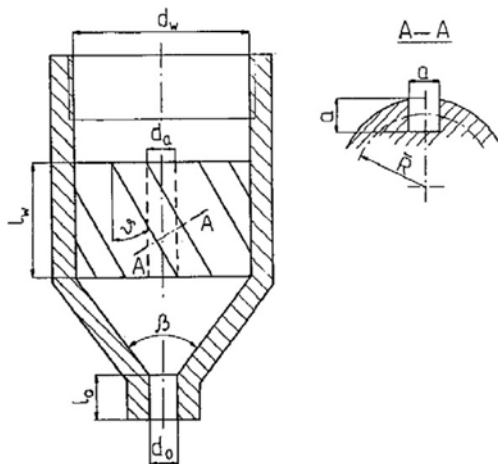
۴. زاویه چتر پاشش (α)، تابعی از اختلاف فشار است و برای انژکتورهای جریان مستقیم صنعتی بین ۳۰ تا ۸۰ درجه است.

انژکتور فشاری- پیچشی از دو قسمت از جمله بدنه و بخش پیچشی جریان تشکیل شده است. شکل (۱) [3] نمایی از این انژکتور را نشان می‌دهد. بخش پیچشی جریان معمولاً به شکل استوانه‌ای است. این استوانه دارای یک کانال محوری برای جریان بدون چرخش و شیارهای تولید کننده جریان پیچشی است. قطر بخش پیچشی d_w بسته به قطر دهانه نازل خروجی d_0 از جدول (۱) تعیین می‌شود. محفظه چرخش (محفظه اختلاط دو رژیم جریان) بین بخش پیچشی و نازل خروجی قرار دارد. زاویه مخروطی محفظه چرخش (β) در بیشتر موارد ۶۰ تا ۱۲۰ درجه است. سطح مقطع شیارهای بخش پیچشی، به صورت مستطیلی یا مربعی است. این شیارها با زاویه v نسبت به جهت محور قرار گرفته‌اند. ماشین‌کاری شیارها و بدنه نسبتاً ساده است. معمولاً بیشینه تعداد شیارها سه عدد است. بر اساس جدول (۲)، زاویه شیب شیارها بر زاویه پاشش α تأثیرگذار است. همچنین، بیشینه زاویه شیب شیارها برابر با ۳۰ درجه است. معمولاً انژکتورها با بخش پیچشی سیال استوانه‌ای برای تامین دبی جریان پایین کاربرد دارند. آن‌ها زاویه پاشش نسبتاً کمی دارند و بیشینه مقدار آن برابر با ۸۰ درجه است. از مزایای این انژکتورها، سادگی در طراحی و امکان جایگزینی بخش پیچشی است. به همین دلیل، آن‌ها بیش از سایر انژکتورهای فشاری- پیچشی کاربرد دارند. عیب آن‌ها احتمال گرفتگی شیارها است [3].

۳- شبیه‌سازی انژکتور فشاری - پیچشی

سطح مشترک بین یک مایع و یک گاز به اصطلاح سطح آزاد^۱ نامیده می‌شود. در پدیده پاشش یک سوخت مایع و پودر شدن آن،

جدول ۴. مشخصات هندسی انژکتور طراحی شده



واحد	مقدار	پارامتر
[mm]	۰.۲۸	a
[mm]	۱	Lw
[mm]	۰.۴	da
[deg]	۱۲۰	β
[mm]	۱	l0
[mm]	۴	dw
[deg]	۱۵	γ
[mm]	۰.۷	d0

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. خصوصیات دو فاز که در اینجا سوخت مایع و هوا است به نرم‌افزار داده می‌شود. برای حل جریان و یافتن سطح آزاد بین دو فاز، از روش حجم سیال (VOF)^۲ استفاده شد و به منظور مدل کردن آشفتگی از مدل K- ϵ استفاده شد. در روش حجم سیال، اگر نسبت حجمی هر سیال (q^{th}) را f_q بنامیم، سه حالت مختلف می‌تواند وجود داشته باشد [5]: برای سلول خالی از سیال q^{th} ، سلول پر از سیال q^{th} و سلول شامل سطح آزاد

برابر با سه عدد انتخاب شد تا از حیث تقارن مخروط پاشش نیز مشکلی پیش نیاید. انژکتور فشاری - پیچشی مورد نظر بر اساس معلومات جدول (۳) طراحی می‌شود. 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 (۵) به دست می‌آید [15]:

$$\dot{m} = \frac{F^{(kg)}}{I_s^{(s)}} \quad (5)$$

دبی جرمی مورد نیاز میکرورانسگر برابر با ۵ گرم بر ثانیه است. با استفاده از رابطه فوق، مقدار دبی جرمی انژکتور با لحاظ ۱۵٪ حاشیه اطمینان طراحی و ساخت، معادل ۰.۰۰۵۷ کیلوگرم بر ثانیه محاسبه شد.

جدول ۳. معلومات طراحی انژکتور

دبی جرمی (kg/s)	چگالی سوخت (kg/m ³)	ویسکوزیته سینماتیکی مایع (m ² /sec)	ویسکوزیته دینامیکی مایع (kg/m.s)
۰.۰۰۵۷	۱۰۲۱	۰.۰۰۰۰۰۱	۰.۰۰۰۰۹

با انجام این مراحل، انژکتور جریان پیچشی یک پایه مورد نظر بر اساس معلومات جدول (۳) طراحی شد و تغییرات فاکتورهای مهم طراحی برای بهینه‌سازی در محدوده مجاز توسط طراح انجام شد. مجهولات کلیدی در طراحی این انژکتور، که به کمک روش فوق محاسبه شده‌اند، در جدول (۴) نشان داده شده است. این انتخاب با در نظر گرفتن مناسب‌ترین اختلاف فشار دو سر انژکتور معادل ۳ بار، در نظر گرفتن ملاحظات هندسی و ساخت انژکتور، مقدار دبی جرمی که تولید توسط این انژکتور تزریق شود و همچنین سرعت متوسط مناسب پاشش سیال از خروجی انژکتور بر روی بستر کاتالیستی صورت گرفته است. در قسمت پیچشی جریان انژکتور، سه شیار و یک ورودی محوری انتخاب شد.

مقادیر اسکالر (نظیر f, κ, ε) به دست می آیند. خصوصیات محلی سیال به صورت زیر است [10]:

$$\begin{aligned}\rho(F) &= \rho_l F + \rho_g (1-F) \\ \mu(F) &= \mu_l F + \mu_g (1-F)\end{aligned}\quad (8)$$

نیروی سطحی پیوسته به صورت زیر است:

$$F_S = \sigma \frac{\rho \kappa n}{1/2(\rho_G + \rho_L)} \quad (9)$$

که k انحنای محلی و n بردار نرمال واحد است.

$$\kappa = \nabla \cdot \hat{n}, \quad \hat{n} = n/|n|, \quad n = \nabla F \quad (10)$$

حرکت فصل مشترک متحرک توسط حل معادله جابه جایی F^2 به صورت زیر است [11]:



- پر، نیمه پر و خالی VOF شکل (۲): وضعیت سلول ها در تحلیل

$$\frac{\partial F}{\partial t} + v \cdot \nabla F = 0 \quad (11)$$

حال به بررسی مدل آشفتگی می پردازیم. در اینجا به طور خاص مدل $k-\varepsilon$ RNG بیان می شود. در این روش، آشفتگی جریان بر اساس یک تکنیک آماری دقیق به کمک روابط ریاضی به دست می آید. معادلات حاکم در این مدل به صورت روابط زیر است:

برای سیال q^{th} ، به ترتیب $f_q = 0$ ، $f_q = 1$ و $0 < f_q < 1$ صادق است. بر اساس این مقدار از f_q ، خواص و پارامترهای مختلف در هر سلول از حوزه حل مشخص می شوند. این مدل در واقع یک روش ردیابی سطح^۱ است که به شبکه بندی ثابت (اویلری) اعمال می شود. این روش برای دو یا چند سیال (فاز) مخلوط نشدنی، که فصل مشترک آن ها جداگانه است، اعمال می شود. دنبال کردن سطح آزاد بین فازهای مختلف با حل یک معادله پیوستگی برای فازهای مختلف صورت می گیرد که در انتها برای هر سلول باید شرط زیر برقرار باشد [9]:

$$\sum_{q=1}^n f_q = 1 \quad (6)$$

معادلات حاکم روش حجم سیال به این صورت است که یک مجموعه از معادلات مومنتوم توسط سیال های تشکیل دهنده جریان دوفازی به شراکت گذاشته می شوند و سهم حجمی هر کدام از سیالات در هر یک از سلول های محاسباتی ردگیری می شوند. در روش VOF، برای کل حوزه حل یک معادله مومنتم حل می شود و سپس با استفاده از حوزه سرعت به دست آمده، مقادیر سرعت در هر فاز مشخص می شود [11]:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot v &= 0 \\ \rho(F) \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) &= \\ -\nabla P + \rho(F)g + \nabla \cdot \left[\mu(F) \left(\nabla v + (\nabla v)^T \right) \right] &+ F_S\end{aligned}\quad (7)$$

همان طور که مشخص است، این معادله مومنتم شامل متغیرهای نسبت حجمی سیالات نمی شود و تنها از طریق چگالی و لزجت از این مقادیر تأثیر می پذیرد. در واقع، در حل معادلات حاکم، به منظور تعیین مشخصات سیال در سلول های نیمه پر نظیر سلول های شکل (۲) بر اساس مقدار F به دست آمده در آن سلول مشخصات محاسبه شده و در معادلات جایگزین می شود. پس از به دست آمدن مقادیر سرعت با استفاده از معادله مومنتم، بر اساس تعریف مسئله صورت گرفته سایر

معادله K:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (12)$$

معادله ε:

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon}) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (13)$$

که μ_{eff} لزجت مؤثر گردیده‌ای است. مقادیر اعداد پرانتل آشفتگی $\alpha_\varepsilon, \alpha_k$ ، از فرمول‌های تحلیلی به دست می‌آیند. ترم R اضافه شده به معادله ε در مدل RNG نسبت به مدل حالت استاندارد، با اصلاح محاسبه لزجت گردابه‌ای باعث اصلاح این معادله در نواحی‌ای که نرخ کرنش زیاد (جریان‌های با سرعت بالا) است، می‌شود.

شکل (۳) 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^۱ انجام گرفته است. معادلات حاکم (ناویر-استوکس) توسط نرم‌افزار انسیس فلوئنت^۲ ۱۹ حل شدند. شرایط مرزی بدین صورت است که در مرز 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، آشفته و تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شد. برای حل از حل گر فشار-مبنا^۳ استفاده شد و معادلات مومنتوم و پیوستگی به طور پی‌درپی حل شدند. برای وابسته کردن میدان سرعت و فشار، الگوریتم سیمپل سی^۴ انتخاب شد. این الگوریتم

در بین خانواده روش‌های سیمپل^۵ عملکرد بهتری دارد. برای میان‌یابی فشار، روش پرستو^۶ به کار 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. معادلات ناویر استوکس به صورت تراکم‌ناپذیر، پایا و سه‌بعدی حل شده و از معادله انرژی صرف‌نظر شده است. نرم‌افزار فلوئنت برای حل معادلات انتگرالی بقای جرم، مومنتوم و کمیت‌های دیگری نظیر توربولانس از روش حجم کنترل استفاده می‌کند، که به وسیله شبکه‌های محاسباتی که در نرم‌افزارهای تولید شبکه‌بندی ایجاد می‌شوند، محیط به حجم کنترل‌هایی گسسته می‌شود. از معادلات اساسی در حجم‌های کنترل مجزا برای تولید معادلات جبری متغیرهای وابسته گسسته شده مثل سرعت و فشار، انتگرال‌گیری می‌شود. سپس معادلات گسسته شده را خطی کرده برای به دست آوردن مقادیر متغیرها، حل دسته معادلات خطی شده انجام می‌گیرد.

استقلال از شبکه برای این هندسه بررسی شد و در نهایت نتیجه گرفته شد که تعداد ۴۲۰ هزار سلول محاسباتی در حوزه حل کافی است. در واقع، با ریز کردن مش به بیش از این تعداد، تغییری در پاسخ حاصل نشد، از این رو، تعداد ۴۲۰ هزار مش در دامنه حل نهایی شد. این بررسی برای پارامترهای مهم مورد بررسی (سرعت متوسط پاشش و دبی جرمی خروجی در دهانه انژکتور) در جدول (۵) نشان داده شده است. صحت‌گذاری این روش حل عددی قبلاً در مراجع [8] و [9] توسط نویسنده انجام شده است.

4 SimpleC
5 Simple
6 Presto

1 Work bench
2 Ansys Fluent
3 Pressure-based

۴- نتایج تحلیل انژکتور فشاری- پیچشی

به منظور در نظر گرفتن تاثیر پارامترهای هندسی بر مشخصه‌های جریان خروجی از انژکتور نظیر ضخامت لایه سیال

جدول ۵. بررسی استقلال شبکه محاسباتی (مش) از حل عددی در

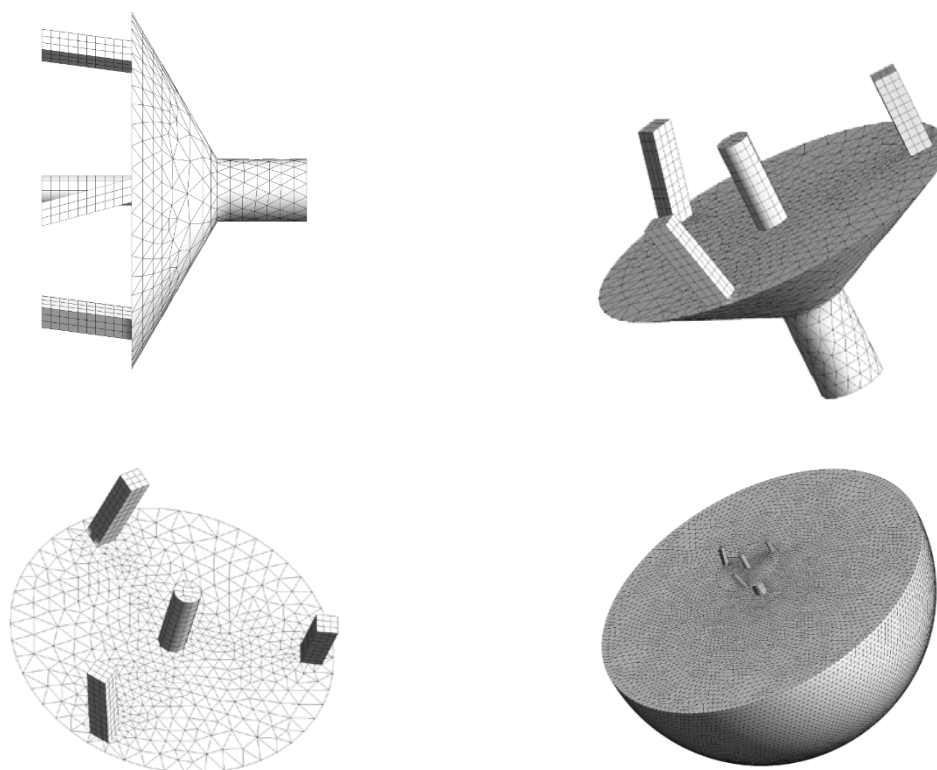
خط شعاعی دهانه نازل تخلیه انژکتور

ردیف	تعداد المان	سرعت متوسط [m/sec]	دبی جرمی [kg/sec]
۱	۱۱۵۳۶۵	۱۴.۱۲	۰.۰۰۵۷۶
۲	۴۲۰۲۸۸	۱۶.۲	۰.۰۰۵۷۰
۳	۷۲۵۸۷۴	۱۶.۲	۰.۰۰۵۷۰
۴	۹۵۱۳۵۰	۱۶.۲	۰.۰۰۵۷۰

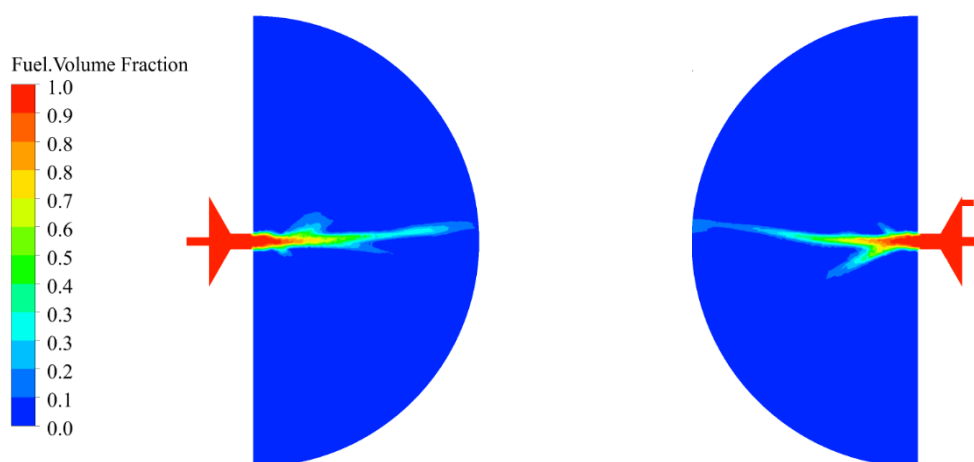
خارج شده، دبی جرمی در اختلاف فشار معین دو سر انژکتور و سرعت متوسط سیال خروجی، تحلیل جریان داخلی انژکتور به کمک نرم‌افزار فلوئنت انجام گرفت. سیال بعد از عبور از ورودی‌ها و قسمت همگرای انژکتور، از نازل انژکتور خارج می‌شود. در این قسمت، پارامتر فشار و پارامترهای هندسی و تاثیر آن‌ها بر روی سرعت خروجی و دبی جرمی انژکتور مورد بررسی قرار می‌گیرد. مشخصات طراحی نهایی انژکتور قبلاً در جدول (۴) نشان داده شده است. این انتخاب با در نظر گرفتن مناسب‌ترین اختلاف فشار دو سر انژکتور معادل ۳ بار، در نظر گرفتن ملاحظات هندسی و ساخت انژکتور، مقدار دبی جرمی که بلید توسط این انژکتور تزریق شود و همچنین سرعت متوسط مناسب پاشش سیال از خروجی انژکتور بر روی بستر کاتالیستی صورت گرفته است.

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. با استفاده از این کانتور، زاویه مخروط پاشش نیز حدود ۳۵ درجه به دست می‌آید. زاویه اسپری، همان زاویه مخروط خروجی از انژکتور تعریف می‌شود. در نرم‌افزار، قرارداد می‌شود که سطح تماس بین دو سیال، جایی در نظر گرفته شود که مقدار کسر حجمی سیال در آن برابر ۰.۵ باشد.

یعنی مقادیر بالاتر از ۰.۵ تا ۱ به سلول‌های پر از سوخت مایع تعلق دارد و مقادیر ۰ تا ۰.۵ به سلول‌های پر از گاز تعلق دارد. شکل (۵)، نمودار کسر حجمی سوخت در خط قطری دهانه نازل تخلیه انژکتور را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است کسر حجمی سوخت تمام سلول‌های مقطع خروجی نازل (به غیر از نزدیک دیواره) برابر با یک است و در نتیجه چتر پاشش انژکتور کاملاً توپر است.

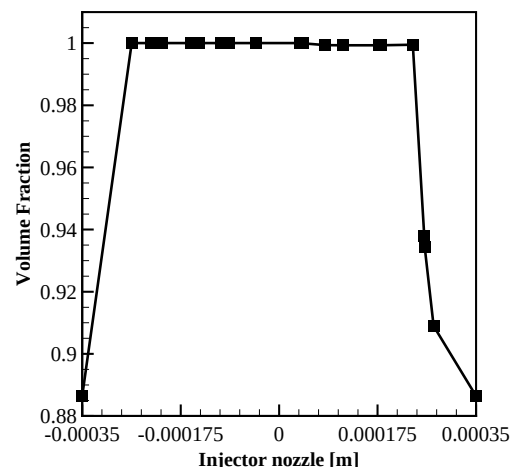


شکل ۳. هندسه شبکه‌بندی شده آنژکتور



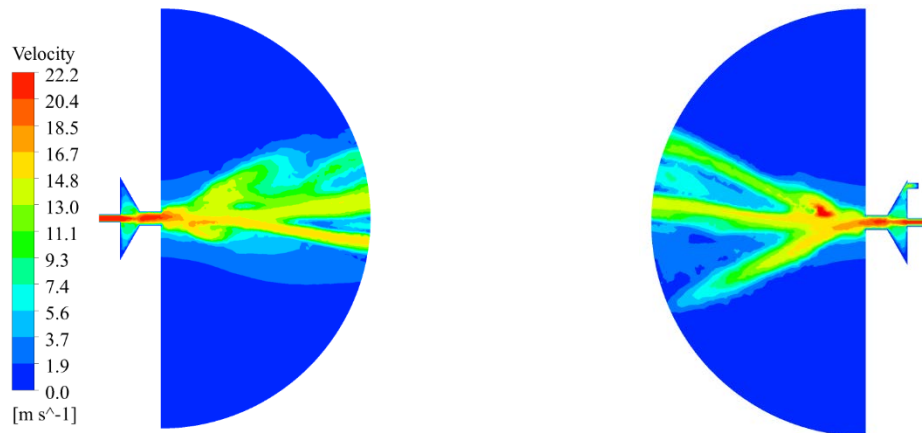
شکل ۴. کانتورهای کسر حجمی سوخت در دو مقطع طولی

همچنین، توزیع سرعت محوری، شعاعی و محیطی در خط قطری دهانه خروجی انژکتور در شکل (۹) ارائه شده‌اند. بر همین اساس در مرکز انژکتور جریان به صورت مستقیم و در نزدیک دیواره به صورت پیچشی از نازل خارج می‌شود. در ادامه، کانتورهای فشار در دو مقطع طولی در شکل (۱۰) نشان داده شده است که به خوبی افت فشار در انژکتور از پشت انژکتور که فشار تزریق ۳ بار نسبی را دارد تا محیط تخلیه که فشار ۱ بار نسبی را دارد، قابل مشاهده است. این کانتور در دو برش ارائه شده است که صفحات برش با هم ۹۰ درجه اختلاف فاز دارند و به هم عمود هستند. مدل انژکتور طراحی شده بر مبنای روش‌های طراحی و تحلیل در بخش‌های قبلی، در نرم‌افزار سالدورک^۱ تهیه شده است. در شکل (۱۱)، شماتیک انژکتور طراحی شده ارائه شده است. همچنین شماتیک بخش پیچشی جریان در شکل (۱۲) نشان داده شده است. این انژکتور از این رو به صورت ماژولار طراحی شده است که قابلیت جانمایی روی تراسترهای کم‌پیشران و همین‌طور قابلیت نصب روی صفحه انژکتور ستاپ آزمایشگاهی را داشته باشد.

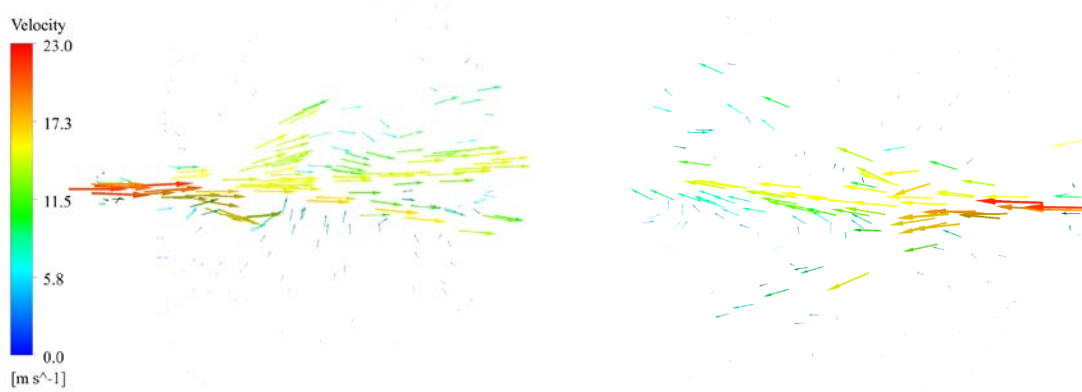


شکل ۵. نمودار کسر حجمی سوخت در خط قطری دهانه تخلیه انژکتور

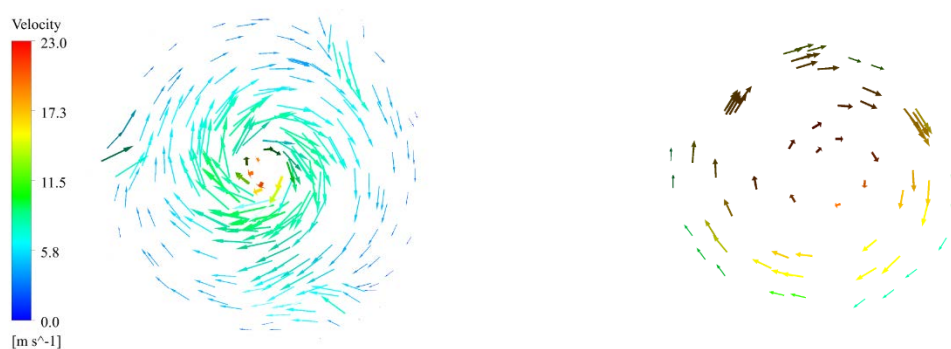
در شکل (۶)، کانتور اندازه سرعت نشان داده شده است. میانگین اندازه سرعت سیال در خروجی نازل معادل ۱۶.۲ متر بر ثانیه و دبی جرمی سوخت برابر ۰.۰۰۵۷ کیلوگرم بر ثانیه به دست آمد. بردارهای سرعت در شکل (۷) و شکل (۸) نشان داده شده است. به ترتیب بردارهای سرعت در مقطع طولی نازل و محیط تخلیه، همچنین در مقطع عرضی دهانه خروجی و مجراهای ورودی نشان داده شده‌اند که در واقع ماهیت پیچشی جریان و طریقه شکل گرفتن جریان پیچشی در ابتدای ورود جریان از طریق مجراها به محفظه چرخش و همچنین مقدار سرعت در هر ناحیه را نشان می‌دهند. در واقع، این بردارها به منظور فهم فیزیک و الگوی جریان درون انژکتور و محیط تخلیه ارائه شده‌اند. نکته قابل توجه این است که، سرعت محوری و محیطی تقریباً از یک مرتبه اندازه هستند. همچنین رفتار سرعت و افت و خیزهای آن از این نمودارها کاملاً قابل ارزیابی است. میانگین اندازه سرعت سیال در خروجی نازل معادل ۱۶ متر بر ثانیه به دست آمد. دبی جرمی سوخت ورودی نیز از این تحلیل با مقدار طراحی کاملاً همخوانی دارد. با بررسی نتایج، این اطمینان حاصل شد که انژکتور طراحی شده، دبی جرمی مورد نظر را در اختلاف فشار معین طراحی می‌تواند تامین کند. همچنین زاویه پاشش مورد نظر نیز توسط آن تامین می‌شود.



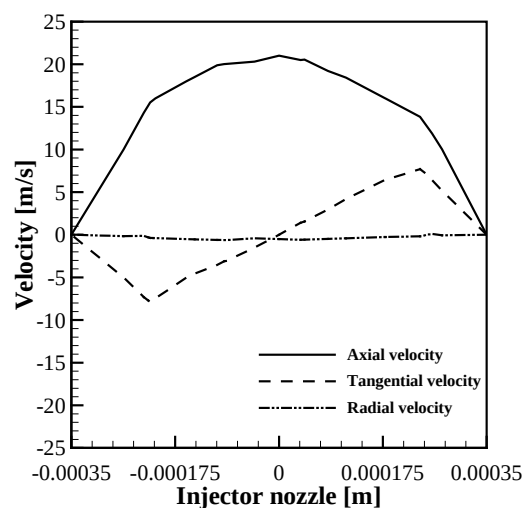
شکل ۶. کانتورهای اندازه سرعت در دو مقطع طولی



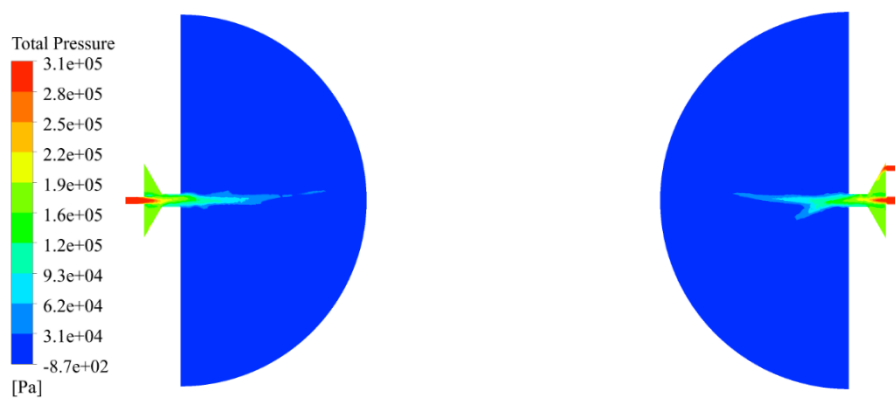
شکل ۷. بردارهای سرعت در دو مقطع طولی



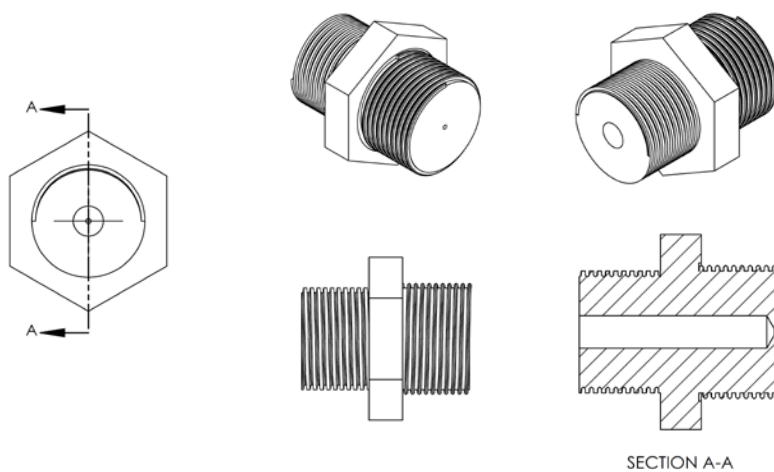
شکل ۸. بردارهای سرعت در راهه ورودی (سمت چپ) و نازل خروجی انژکتور (سمت راست)



شکل ۹. توزیع سرعت محوری، شعاعی و محیطی در دهانه خروجی انژکتور



شکل ۱۰. کانتورهای فشار در دو مقطع طولی



شکل ۱۱. شماتیک انژکتور طراحی شده

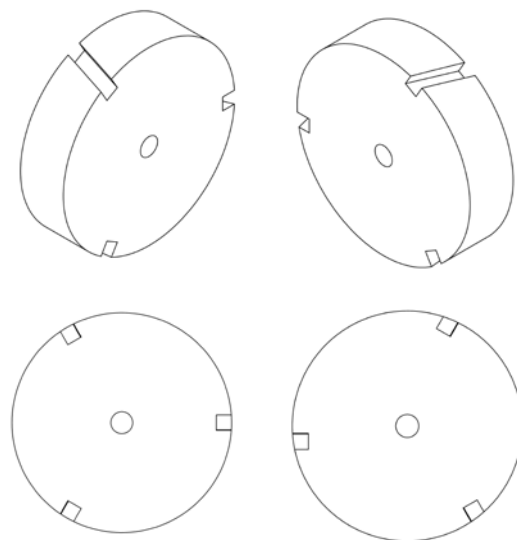
صنعتی مختلف با هدف کاهش هزینه‌ها به کار رود. این نوع انژکتور به دلیل پیچیدگی هندسه داخلی آن و همچنین به دلیل ابعاد بسیار کوچک در کاربری‌های کم‌پیشران با مشکلاتی در فرایند ساخت و تولید بالاخص در داخل کشور مواجه می‌است. در صورتی که بتوان موانع ساخت را رفع نمود، این انژکتور برای سامانه‌های کم‌پیشران نسبت به نوع کاپیلاری (جریان مستقیم) و نوع جریان پیچشی ارجحیت دارد، زیرا مخروط اسپری حاصله از آن نه مانند نوع جریان پیچشی آنقدر بزرگ و توخالیست که پوشش‌دهی بستر کاتالیستی را با مشکل مواجه کند و نه مانند نوع کاپیلاری (جریان مستقیم) آنقدر کم‌سرعت و کوچک‌زاویه است که پوشش‌دهی کامل بستر کاتالیستی را با مشکل مواجه کند. با انژکتور جریان مستقیم به دلیل چتر کوچک و توپر انژکتور، طراح محفظه کاتالیستی قادر است تا ابعاد شعاعی محفظه را به اندازه چشم‌گیری کاهش دهد. از طرفی طرح انژکتور فشاری- پیچشی یک طرحی است که شرایطی که ایجاد می‌کند به نوعی میانگین شرایط انژکتور جریان مستقیم و انژکتور جریان پیچشی است. یعنی، مزایای هر دو طرح را در خود دارد. در واقع، هم چتر پاشش بزرگتری نسبت به نوع جریان مستقیم دارد که پوشش‌دهی کاتالیست را بهتر می‌کند، در عین حال چتر پاششی که ایجاد می‌کند به بزرگی حالت انژکتور جریان پیچشی نیست که ابعاد شعاعی محفظه را بزرگ کند. از طرفی، مثل انژکتور جریان پیچشی، چتر پاشش توخالی ندارد که پوشش‌دهی بخش مرکزی بستر کاتالیستی را با مشکل مواجه کند. سرعت جریان خروجی نیز بین دو حالت فوق است. بنابر توضیحات فوق، در صورتی که موانع بر سر راه ساخت انژکتورهای فشاری- پیچشی برای کاربری‌های کم-پیشران نظیر ۱۰ نیوتنی (با توجه به ابعاد بسیار ریز آن و هندسه داخلی پیچیده آن) رفع شود، یک انتخاب خوب برای جانمایی در تراستر ۱۰ نیوتنی تک‌مولفه‌ای کاتالیستی خواهد بود.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

تشکر و قدردانی

اد



شکل ۱۲. شماتیک بخش پیچشی جریان انژکتور طراحی شده

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، رویه طراحی، شبیه‌سازی و تحلیل یک انژکتور فشاری- پیچشی تک‌پایه با سه ورودی زاویه‌دار و یک ورودی محوری به منظور استفاده در یک رانشگر تک‌مولفه‌ای کاتالیستی کم‌پیشران ۱۰ نیوتنی ارائه شده است. پارامترهای هندسی انژکتور در مرحله طراحی با در نظر گرفتن خصوصیات فیزیکی سوخت مورد نظر (در اینجا هیدرازین) محاسبه شده‌اند. با بررسی نتایج، این اطمینان حاصل شد که انژکتور طراحی شده، دبی جرمی مورد نظر (حدود ۵/۸ گرم بر ثانیه) را در اختلاف فشار معین طراحی (۳ بار نسبی) می‌تواند تامین کند و الگوی پاشش مناسبی را رقم بزند. همچنین زاویه پاشش مورد نظر (حدود ۳۵ درجه) نیز توسط آن تامین می‌شود. در واقع، این انژکتور به‌گونه‌ای طراحی شد تا مشخصه‌های مناسب برای استفاده در این کاربری خاص را تامین کند. با توجه به اینکه مطالعه مشخصات جریان داخلی انژکتور، به دلیل اندازه کوچک انژکتور، به صورت تجربی سخت است، این روش عددی می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های تجربی باشد که اولاً هزینه بسیاری را در بر دارد و ثانیاً دستگاه‌های اندازه‌گیری دقیق نیز همیشه در دسترس نیست و به علت هزینه زیاد خرید و نگهداری دارای صرفه اقتصادی نیستند. از این رو می‌تواند به عنوان ابزاری مفید در روند تحلیل، طراحی و بهینه‌سازی انژکتورها در کاربردهای

مراجع

- [9] S.M. Hosseinalipour, H. Karimaei, E. Movahednejad, F. Ommi, "Application of maximum entropy principle for estimation of droplet-size distribution using internal flow analysis of a swirl injector", *Int J Spray Combust Dyn*, Vol. 8, No.3, pp. 205–16, 2016.
- [10] H. Karimaei, "Design of Physical Configuration of a 10N Monopropellant Hydrazine Thruster", *Journal of Space Science and Technology (JSST)*, Vol. 11, No.1, pp. 9–19, 2019. (in persian)
- [11] H. Karimaei, M. Salimi, H. Naseh, E. Jokari, "Design and Simulation of Fuel Injector of a 10N Monopropellant Hydrazine Thruster", *Journal of Space Science and Technology (JSST)*, Vol. 12, No.3, pp. 13–22, 2019. (in persian)
- [12] A.H.A. Hamid, "Atan R. Spray characteristics of jet-swirl nozzles for thrust chamber injector", *Aerosp Sci Technol.*, Vol. 13, No.4, pp. 192–6, 2009.
- [13] T.R. Nada, A.A. Hashem, "Geometrical characterization and performance optimization of monopropellant thruster injector", *Egypt J Remote Sens Sp. Sci.*, Vol. 15, No.2, pp. 161–9, 2012.
- [14] H. Karimaei, R. Ghorbani, S.M. Hosseinalipour, "Implementation of linear stability theory on hollow cone-shaped liquid sheet", *Period Polytech Mech Eng*, Vol. 64, No.3, pp. 179–88, 2020.
- [15] F. Ommi, *Space Propulsion and Rocket*, 2nd edition, Tarbiat Modarels Publication, 2017, pp. 90-100 (in persian)
- [1] C.D. Brown, *Spacecraft propulsion*, Washington DC, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996, pp. 120-130.
- [2] C.Y. Han, J.M. Choi, "Thermal analysis of spacecraft propulsion system and its validation", *KSME Int J.*, Vol. 18, No.5, pp. 847–56, 2004.
- [3] L. Bayvel, Z. Orzechowski, *liquid atomization*, Washington DC, Taylor & Francis, 1993, pp. 115-125.
- [4] V. Shankar, K.A. Ram, K.A. Bhaskaran, "Prediction of the concentration of hydrazine decomposition products along a granular catalytic bed", *Acta Astronaut*, Vol. 11, No.6, pp. 287–99, 1984.
- [5] V. Shankar, K. Anantha Ram, K.A. Bhaskaran, "Experimental investigations of the 10 N catalytic hydrazine thruster", *Acta Astronaut*, Vol. 12, No.4, pp. 237–49, 1985.
- [6] J.N. Hinckel, J.A.R. Jorge, T.G.S. Neto, M.A. Zacharias, J.A.L. Palandi, Low cost catalysts for hydrazine monopropellant thrusters, *45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Jt Propuls Conf Exhib*, 2009.
- [7] T. Franken, F. Valencia-Bel, B.V.S. Jyoti, B. Zandbergen, Design of a 1-N monopropellant thruster for testing of new hydrogen peroxide decomposition technologies, *Aerosp Eur Conf 2020*, Fr 25-28 Febr 2020.
- [8] S.M. Hosseinalipour, H. Karimaei, "A new model based on coupling of MEP/CFD/ILIA for prediction of primary atomization", *Can J Chem Eng*, Vol. 97, No.4, pp. 792–802, 2016.



COPYRIGHTS

© 2022 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. 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/>)