

علمی- پژوهشی

تأثیر هندسه داخلی انژکتور سوخت یک رانشگر تک‌مولفه‌ای هیدرازینی ۱۰ نیوتنی بر مشخصه‌های لایه سیال خروجی از آن

حدیثه کریمایی^۱

گروه علوم فضایی

پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۱)

چکیده

رانشگرهای هیدرازینی، پرکاربردترین رانشگرهای سامانه‌های هدایت و کنترل وضعیت محموله‌های بازگشتی و سرنشین‌دار می‌باشند. در این مقاله، تأثیر هندسه داخلی انژکتور بر مشخصه‌های لایه سیال خروجی از آن نظیر ضخامت لایه، زاویه مخروط پاشش، سرعت میانگین و همچنین دبی جرمی آن، مطالعه شده است. مطالعات پارامتری پیرامون هندسه پایه انژکتور مورد مطالعه مربوط به یک رانشگر تک‌مولفه‌ای هیدرازینی ۱۰ نیوتنی است. این انژکتور، به‌گونه‌ای طراحی شد که یک زاویه پاشش متوسط و ضخامت لایه خیلی کم به دست می‌دهد که با توجه به محدودیت طول محفظه کاتالیستی مناسب بوده و پودرسازی ریزتری به دست دهد. بدین منظور، شبیه‌سازی جریان داخلی انژکتور بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از روش حجم سیال (VOF) به منظور پیش‌بینی مشخصه‌های جریان انجام شد و آشفتگی جریان نیز با استفاده از مدل $k-\epsilon$ شبیه‌سازی شد. سپس مطالعات پارامتریک برای بررسی تأثیر هندسه صورت گرفت. شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزارهای انسیس-ورک‌بنچ و انسیس-فلوئنت انجام شد. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که ساختمان داخلی انژکتور و فاکتورهای مختلف هندسی آن، تأثیر قابل توجهی بر کنترل مشخصه‌های لایه سیال خروجی دارد. نتایج نشان داد بیشترین تأثیر را بر روی مشخصات اسپری خروجی، نسبت شعاع گردش سیال به شعاع نازل و به شعاع مجرای ورودی دارند. به طوری که سرعت میانگین کمینه در نسبت‌های بالای شعاع گردش سیال به شعاع نازل و به شعاع مجرای ورودی و محقق گردیده و سرعت میانگین بیشینه در نسبت‌های کوچک آن به دست می‌آید.

واژه‌های کلیدی: لایه سیال، رانشگر تک‌مولفه‌ای، مخروط اسپری، هندسه داخلی انژکتور

The Effect of internal geometry of the fuel injector of a 10N Monopropellant Hydrazine Thruster on the outlet liquid sheet characteristics

Karimaei, H.

Space Science Department

Aerospace Research Institute, Ministry of science, research and technology

(Received: 07/April /2021 ; Accepted:02/August /2021)

ABSTRACT

Hydrazine monopropellant thrusters are most widely used for navigation and control systems of re-entry and manned payloads. In this paper, the effect of the internal geometry of the injector on the characteristics of the outlet liquid sheet, such as the liquid sheet thickness, the spray cone angle, the average output velocity, and its mass flow rate, has been studied. The injector chosen for the case study is the fuel injector of a 10N monopropellant hydrazine thruster. This injector was designed in such a way to achieve a medium spray angle and a very small sheet thickness, which is suitable considering the limited length of the catalytic chamber and leads to finer atomization. For this purpose, simulation of the internal flow based on the computational fluid dynamics is performed to predict the output flow characteristics, and then parametric studies are conducted to investigate the effects of geometry. The results of these studies show that the internal structure of the injector has a great influence on the control of the characteristics of the liquid sheet, and the ratios of fluid swirl radius to the nozzle radius/inlet duct radius have the greatest effect on the output spray characteristics, so that minimum average speed is achieved at larger ratios and maximum average speed is obtained at smaller ratios.

Keywords: Swirl Injector, Monopropellant, Spray Cone, Low Thrust

فهرست علائم و اختصارات

f_q	نسبت حجمی هر سیال، -
h	فاصله مجرای ورود تا نازل خروج، m
l_c / d_c	نسبت طول نازل به قطر نازل، -
l_{Bx} / d_{Bx}	نسبت طول مجرای ورود به قطر مجرا، -
R_Z / r_c	نسبت شعاع گردش سیال به شعاع دهانه نازل، -
R_Z / r_{Bx}	نسبت شعاع گردش سیال به شعاع دهانه ورودی، -

علائم یونانی

2ψ	زاویه پخ ورودی به نازل، deg
---------	-----------------------------

۱- مقدمه

رانشگرهای تک‌مولفه‌ای در سامانه‌های پیشران‌ها ماهواره‌ها با هدف انجام مأموریت‌هایی نظیر کنترل ارتفاع و وضعیت ماهواره لازم بوده و بسیار استفاده می‌شود. 1. در رانشگرهای تک‌مولفه‌ای، واکنش احتراق با عبور جریان پیشران از محفظه کاتالیست صورت می‌گیرد. در ایران، این نوع رانشگر تاکنون طراحی و ساخته نشده است و به دلایل سیاسی امکان واردات آن نیز وجود ندارد. رانشگر تک‌مولفه‌ای شامل شیرکنترل جریانی، سامانه پاشش، کاتالیست، محفظه یا بستر کاتالیست، گرم‌کن و نازل است. در این رانشگرها، پیشران با عبور از شیر کنترل جریان و پاشش به کمک انژکتور روی سطح کاتالیست پیش‌گرم، طی یک فرآیند گرمازا تبخیر و تجزیه شده و با عبور از خروجی نازل، نیروی رانش تولید می‌کند. از این رو انژکتور به‌عنوان یک المان مهم در این فناوری برای پودر نمودن سوخت عمل می‌کند.

فرآیند قطره‌سازی^۱ را می‌توان فرآیندی که در آن حجمی از مایع به تعداد زیاد قطره تبدیل می‌شود، تعریف نمود. وارد شدن سیال با سرعت زاویه‌ای بالا به درون محفظه چرخش انژکتور، باعث ایجاد چرخش سیال در آن می‌گردد که در نتیجه، یک لایه نازک سیال از آن خارج شده و به‌صورت یک اسپری مخروطی شکل توخالی پخش می‌شود. 2. در طی دهه اخیر، با افزایش امکانات سخت‌افزاری و قابلیت‌های محاسباتی، تلاش بسیاری در توسعه مدل‌سازی‌های عددی دقیق، شده است. بیلو و همکارانش 3 جریان دوفازی داخل نوعی انژکتور هوادمشی^۲

را به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند. در آن مطالعه، ضخامت و یکنواختی سرعت فیلم سیال و زاویه خروج از اریفیس بررسی شد. آنها روش حجم سیال را برای مدل‌سازی جریان دوفازی استفاده نمودند که نتایج آنها با نتایج تجربی انطباق خوبی داشت. نقید و همکاران 4 مطالعه تحلیلی و تجربی روی شکست لایه مایع انجام دادند و اثرات شکل انژکتور و اختلاف فشار دو سر انژکتور را بر مشخصه‌های لایه مایع برای چهار انژکتور مختلف بررسی کردند. برخی از متخصصان تلاش کردند تا جریان چندفازی درون نازل را با اسپری مرتبط سازند. این مطالعات به‌ناچار همگی نیمه‌تجربی هستند. هاو و گسمن 5 نیز مدلی برای شکست اولیه ارائه کردند که در آن فرض بر آن بود که نوسانات آشفتگی در جریان داخلی جت عامل اصلی اغتشاشات اولیه روی سطح جت است. سپس این اغتشاشات بر اساس ناپایداری‌های کلوین-هلمهولتز رشد می‌کنند. سار 6 مدل جریان سیال در نازل را به‌منظور شبیه‌سازی تأثیر هندسه نازل بر فرآیند اسپری در کد کیوا^۳ ایجاد کرد. روش او مشخصه‌های جریان را پیش‌بینی می‌کرد. این مدل، پارامترهایی چون شکل ورودی راهگاه، افت مسیر، کویتاسیون و فشار پاشش را مورد توجه قرار داده و ضریب عبور جریان انژکتور، سرعت مؤثر خروجی و اندازه‌ی قطرات اولیه را محاسبه می‌کرد.

کلین 7 مشخصه‌های سرعت جریان خروجی از نازل و آشفتگی آن را با دو روش مدل کرد. در روش اول، از شبیه‌سازی عددی مستقیم جت مغشوش صفحه‌ای استفاده کرد و تأثیر جریان داخلی نازل را بررسی کرد. در روش دوم اتمیزاسیون را مستقل از جریان داخل نازل در نظر گرفت. بر اساس نظر کلین نتایج حل عددی مستقیم جت سیال، لایه مرزی آن و شکست اولیه لایه سیال به شرایط جریان داخلی بسیار حساس است. ترین و چن [۸-۱۰] از نتایج مدلی که برای شکست اولیه توسعه دادند، مشاهده کردند که مقادیر آشفتگی اولیه یک نقش کلیدی روی گسیختگی جت بازی می‌کند. مقادیر آنها از هندسه و شرایط جریان نازل به‌دست می‌آید. حسینعلی‌پور و همکاران 11 به کمک تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی، عملکرد یک انژکتور دوفازی Y شکل را که به‌عنوان انژکتور سوخت مازوت در نیروگاه

¹ Atomization² Airblast³ Kiva II

تعدادی از پارامترهای عملکردی به‌صورت تابعی از فشار، اعداد رینولدز و وبر را بیان نمود. نتایج نشان داد ضریب تخلیه تنها به شکل هندسی انژکتور وابسته نیست و با افزایش عدد رینولدز تغییر می‌کند.

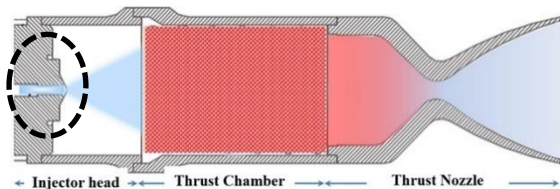
در مقاله حاضر، تأثیر هندسه داخلی انژکتور سوخت یک رانشگر تک‌مولفه‌ای هیدرازینی ۱۰ نیوتنی بر مشخصه‌های لایه سیال خروجی از آن ارائه شده است. این انژکتور از نوع جریان پیچشی با دو ورودی مماسی می‌باشد. انژکتورهای که اسپری توپر ایجاد می‌کنند (مثل انژکتورهای فشاری جریان چرخشی) بیشتر برای تراسترهای تک‌پایه‌ای استفاده می‌شوند که نیروی تراست آنها بالا باشد. چون بحث مقاله حاضر مربوط به یک میکرو تراستر ۱۰ نیوتنی است که نرخ دبی جرمی سوخت تزریقی آن از حدود 0.065 کیلوگرم بر ثانیه تجاوز نمی‌کند، در صورت طراحی یک انژکتور فشاری جریان چرخشی، آن‌قدر سوراخ‌های ورودی و راه‌های ورودی آن کوچک می‌شوند (مثلاً حدود 0.1 میلی‌متر) که برای ساخت آن مشکل جدی به وجود می‌آید و نیاز به یک فرآیند پیچیده ساختی برای ساخت راه‌ها می‌باشد. به دلیل این پیچیدگی‌ها امکان ساخت آن در داخل ایران فراهم نمی‌باشد. از این‌رو یک انژکتور جریان چرخشی که اسپری توخالی ایجاد می‌کند می‌توانست به‌عنوان یک کانسپت و نوآوری، جایگزین خوبی باشد. به این دلیل که هم ابعاد آن بزرگ‌تر می‌شود و ساخت تسهیل می‌شود، هم قطرات ریزتری به‌دست می‌دهد و هم اینکه پیک توزیع قطرات (تجمع بیشتری از قطرات) به‌جای منطقه وسط کاتالیست کمی به سمت شعاع خارجی کشیده شده و سطح در دسترس بیشتری به تجمع قطرات در برخورد با بستر کاتالیستی می‌دهد. نوآوری کار حاضر، استفاده از انژکتور جریان چرخشی برای پودرسازی سوخت هیدرازین است زیرا پیش از این در نمونه‌های خارجی از نمونه‌های انژکتور کاپیلاری (مویین) و یا فشاری برای تولید اسپری استفاده می‌شد. لذا در این پروژه تلاش شد تا با این نوع انژکتور به دلیل اینکه پودرسازی ریزتری را نسبت به انواع دیگر می‌دهد و اینکه به دلیل دارا بودن ابعاد نهایی بزرگ‌تر و ساختار ساده، مشکلات ساخت آن بسیار کمتر است، این میزان تراست ۱۰ نیوتن را برای رانشگر (تراستر) تک‌مولفه‌ای هیدرازینی تأمین نمود. مدل‌سازی و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی این انژکتور انجام شد و

استفاده می‌شد بررسی نمودند. آنها از روش حجم سیال برای پیدا کردن سطح مشترک مازوت و بخار در داخل انژکتور استفاده نمودند. حسینعلی‌پور و همکاران [۱۲] به کمک تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی، تأثیر دبی جرمی سوخت را بر روی مشخصه‌های لایه سیال خروجی از یک نوع انژکتور گریز از مرکز مربوط به انژکتور اکسیدکننده در موتورهای دومولفه‌ای بررسی نمودند و نشان دادند که چگونه ضخامت لایه سیال خروجی و همچنین زاویه بازشدگی مخروط پاشش با دبی جرمی تغییر می‌کند. حسینعلی‌پور و کریمائی [۱۴-۱۳] اثر هندسه داخلی انژکتور را به توزیع پاشش مرتبط نمودند. عسگری و همکاران [۱۵] اثرات چرخش جریان هوا روی اتمیزاسیون یک اسپری مخروط توخالی لزج چرخان تحت نوسانات سینوسی را مورد بررسی قرار دادند. این کار به‌روش تحلیلی خطی انجام شد و در نهایت، معادله توزیع بدون بعد نرخ رشد موج را به‌دست آوردند. نتایج نشان داد که بیشینه نرخ رشد موج، با طول شکست اولیه اسپری مرتبط بوده و با افزایش آن، طول شکست کوتاه‌تر شده و قطر قطرات کاهش می‌یابد که نتیجه آن بهبود احتراق و کاهش مصرف سوخت در صورت استفاده از این سامانه در موتور می‌باشد.

کریمائی [۱۶] طراحی و شبیه‌سازی انژکتور سوخت یک میکرو-رانشگر تک‌مولفه‌ای هیدرازینی با پیشران ۱۰ نیوتن را انجام داد. او از روش حجم سیال VOF^۱ برای شبیه‌سازی جریان استفاده کرد و اثر آشفتنگی جریان را نیز با مدل k-ε مدل نمود و سپس مشخصه‌های لایه سیال خروجی را استخراج نمود. کریمایی و همکاران [۱۷] به‌منظور لحاظ نمودن اثر پارامترهای هندسی بر خصوصیات جریان خروجی از انژکتور یک رانشگر تک‌مولفه‌ای هیدرازینی ۱۰ نیوتنی، نظیر ضخامت لایه سیال خارج شده، دبی جرمی در اختلاف فشار معین دو سر انژکتور، زاویه مخروط چتر پاشش، سرعت متوسط سیال خروجی، و همچنین اطمینان از اینکه ستون گاز به‌درستی در داخل آن شکل گرفته است، تحلیل جریان داخلی انژکتور جریان پیچشی طراحی شده را، به کمک نرم‌افزار فلوئنت انجام دادند. نوذر اکبری ۱۸ مطالعه رفتار پاشش و شناخت بهتر انژکتور فشاری پیچشی دوگانه جهت بهبود طراحی‌های آتی آن را انجام داد. لذا تأثیر

¹ Volume of fluid

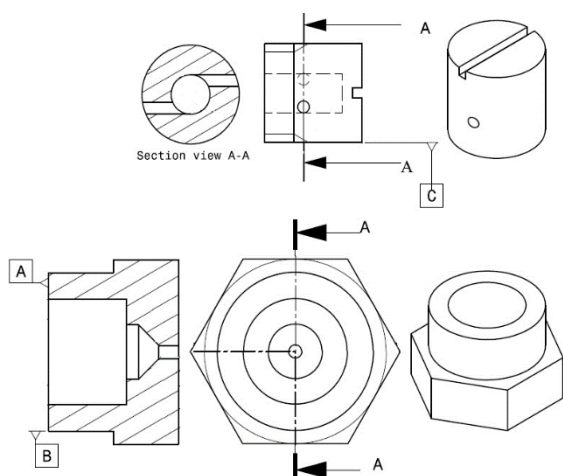
پایا حل کرد. در پیاده‌سازی مدل VOF، امکان در نظر گرفتن کشش سطحی نیز وجود دارد که لحاظ گردید.



شکل (۱): طرح‌واره‌ای از یک رانش‌گر تک پیش‌رانه کاتالیستی

جدول (۱): مشخصات عملکردی و هندسه پایه انژکتور

مشخصه	مقدار
دبی جرمی (kg/s)	≈ 0.064
اختلاف فشار دو سر انژکتور (bar)	۵/۰
زاویه مخروط پاشش (deg)	۶۰
قطر نازل انژکتور (mm)	۱/۰
قطر مجراهای ورودی (mm)	۰/۶
قطر محفظه پیچش (mm)	۲/۰
طول محفظه پیچش (mm)	۲/۰



شکل (۲): طرح‌واره انژکتور طراحی‌شده برای رانش‌گر تک پیش‌رانه کاتالیستی

به منظور مدل‌کردن آشفتگی نیز 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 16. برای سلول خالی از سیال q^{th} ، سلول پر از سیال q^{th} و

مشخصه‌های لایه سیال خروجی از انژکتور استخراج شد. هدف از این مطالعه پارامتریک، یافتن میزان تأثیر کیفی و کمی پارامترهای هندسی انژکتور بر مشخصه‌های لایه سیال خروجی و میزان دبی جرمی عبوری است. از آنجا که برای همه تکرارهای طراحی^۱، امکان ساخت و آزمایش انژکتور وجود ندارد، به همین دلیل، تحلیل عددی می‌تواند بسیار کمک‌کننده باشد و به اصلاح طراحی کمک کند.

۲- انژکتور مورد مطالعه

مورد مطالعه، انژکتور سوخت یک رانش‌گر تک‌مولفه‌ای هیدرازینی ۱۰ نیوتنی (به صورت شکل ۱) از نوع جریان پیچشی می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده‌اند. شماتیک انژکتور طراحی‌شده در نرم‌افزار کتیا^۲ به صورت ماژولار (دو تکه) تهیه شده که به صورت شکل ۲ می‌باشد.

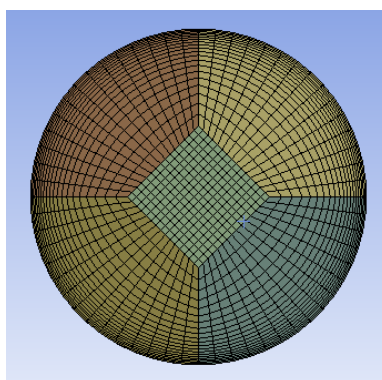
۳- تحلیل پارامتریک

۳-۱- مدل عددی دینامیک سیالات محاسباتی

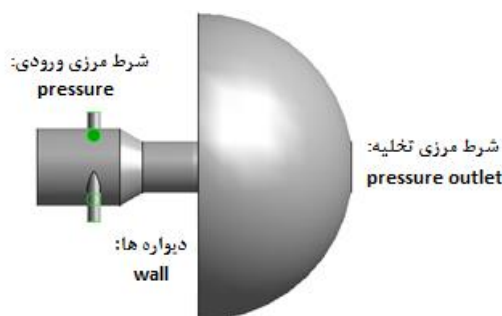
از آنجا که در انژکتور مورد نظر، جریان دوفازی است، برای تحلیل آن نیاز به استفاده از یک مدل جریان دوفازی است. برای ردیابی سطح و حل جریان دوفازی و یافتن سطح آزاد بین دو فاز از روش VOF استفاده شد که با اعمال بر یک شبکه‌بندی ثابت اولرین، معادلات مومنتوم را حل می‌کند. به منظور مدل‌کردن آشفتگی از مدل K-ε RNG استفاده شد که این روش برای جریان‌های پیچشی توصیه شده است. متغیرها و مشخصات در هر سلول بسته به مقادیر کسر حجمی، یا مربوط به یک فاز بوده و یا به مخلوطی از فازها مربوط است. سطح مشترک بین یک مایع و یک گاز اصطلاحاً سطح آزاد نامیده می‌شود. در پدیده پاشش یک سیال مایع و اتمیزه شدن آن، مرز بین جت مایع و هوا یک سطح آزاد می‌باشد، بنابراین باید از روش‌های عددی که مخصوص بررسی سطح آزاد بین یک مایع و یک گاز می‌باشد نظیر مدل VOF استفاده نمود. از هوا به عنوان سیال اول و از هیدرازین به عنوان سیال دوم استفاده شده است. این روش دو طرح دارد که از طرح ضمنی آن استفاده شده است. فقط با استفاده از این طرح می‌توان جریان را به صورت

^۱ Design iteration

^۲ Catia



شکل (۳): شبکه‌بندی مقطع نازل انژکتور در محیط نرم‌افزار ورک‌بنچ



شکل (۴): نوع شرایط مرزی

۵. زاویه پخ ورودی به نازل (2ψ)

این پارامترها در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. بر این اساس، اثر زاویه پخ همگراکننده انژکتور، نسبت طول به قطر نازل انژکتور، نسبت طول مجرای ورود به قطر مجرا، نسبت شعاع گردش به شعاع نازل، نسبت شعاع گردش به شعاع دهانه نازل و دهانه ورودی و اثر قطر و طول محفظه گردش بر روی مشخصه‌های لایه سیال خروجی اعم از ضخامت لایه، زاویه مخروط پاشش، سرعت میانگین و همچنین دبی جرمی آن بررسی شده است.

در بحث صحت‌سنجی نتایج همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، نتایج شبیه‌سازی عددی (CFD) جریان داخلی از قبیل ضخامت لایه سیال در دهانه خروجی نازل (و قطر ستون هوا)، زاویه اسپری، سرعت مایع در خروج و مسیر چرخش سیال در نرخ جریان جرمی معلوم در اختلاف فشار نامی ۳/۵ bar، در توافق خوبی از نظر کیفی و کمی با داده‌های تجربی می‌باشد. اختلاف در مقدار ضخامت لایه و زاویه پاشش به‌دست‌آمده از روش عددی حاضر با

سلول شامل سطح آزاد برای سیال q^{th} ، به ترتیب $f_q = 0$ ، $f_q = 1$ و $0 < f_q < 1$ صادق است. براساس 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^۱ است که به یک شبکه‌بندی ثابت (اویلری) 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 با حل یک معادله پیوستگی برای فازهای مختلف صورت می‌پذیرد که در انتها برای هر سلول باید شرط ذیل برقرار باشد:

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

جزئیات طراحی، مدل عددی و نتایج تحلیل انژکتور پایه با مشخصات جدول ۱ به تفصیل در مرجع [۱۴] توسط همین نویسنده موجود است. لازم به ذکر است که شبکه لایه مرزی با ۷ لایه در مدل ایجاد شده است و مش‌بندی در آن ناحیه کاملاً ریزتر صورت گرفته است. نمایی از شبکه محاسباتی در مقطع نازل انژکتور که مش ریزتر در لایه مرزی نیز در آن مشهود است در شکل ۳ نشان داده شده است. نوع شرایط مرزی نیز در شماتیک شکل ۴ ارائه شده است. از آنجا که هدف مقاله حاضر طراحی نبوده و بحث اصلی بررسی روند تغییرات مشخصه‌های لایه سیال تحت تأثیر پارامترهای هندسی داخلی انژکتور می‌باشد، به‌منظور پرهیز از انتشار مطالب تکراری از تکرار آن خودداری شده و در این مقاله صرفاً روی تحلیل پارامتریک به‌منظور بررسی اثر هندسه داخلی این نوع انژکتور بر مشخصه‌های لایه سیال خروجی، بحث می‌گردد. هندسه پایه در مقاله حاضر تحت عنوان case study 1 ارائه شده است.

۳-۲- تحلیل پارامتریک و نتایج

فاکتورهای مهم طراحی انژکتور پیچشی عبارت‌اند از 1:

۱. فاصله مجرای ورود تا نازل خروج (h)
۲. نسبت طول نازل به قطر نازل (l_c / d_c)
۳. نسبت طول مجرای ورود به قطر مجرا (l_{Bx} / d_{Bx})
۴. نسبت شعاع گردش سیال به شعاع دهانه نازل و دهانه ورودی (R_Z / r_c و R_Z / r_{Bx})

¹ Surface-tracking technique

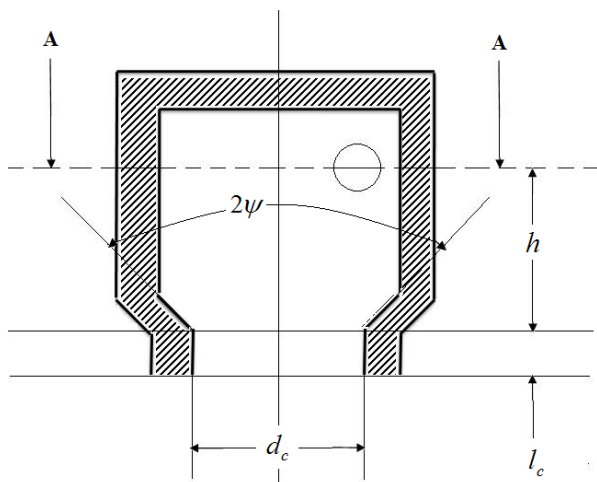
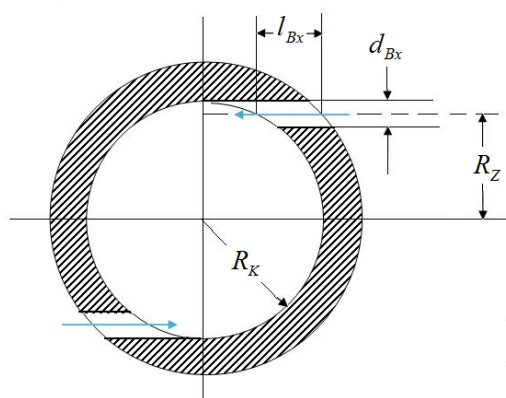
صحت‌سنجی خود روش حل عددی همچنین قبلاً در مقالات مراجع [۱۳ و ۱۴] توسط همین نویسندگان انجام شده است، از این‌رو از تکرار خودداری شده و صرفاً نتایج تحلیل‌های پارامتریک ارائه شده‌اند.

نتایج تعدادی از تحلیل‌های پارامتریک در جدول ۳ ارائه شده است. در هر ستون مربوط به نتایج، به‌منظور طبقه‌بندی کمی نتایج، طیف رنگی از سبز تا قرمز (از زیاد به کم به‌صورت نزولی) بر روی نتایج اعمال شده است. بر این اساس اثر پارامترهای گوناگون شامل طول و قطر محفظه چرخش، نسبت طول به قطر نازل، نسبت طول به قطر مجرای ورودی، نسبت شعاع گردش به شعاع نازل و نسبت شعاع گردش به شعاع مجرای ورودی بر روی کمیت‌های هدف شامل دبی جرمی، ضخامت لایه، زاویه اسپری و سرعت میانگین لایه سیال مطالعه گردید. همچنین وضعیت تشکیل ستون گاز نیز گزارش گردید.

داده‌های تجربی عموماً به دلیل خطاهای ناشی از تقریب‌های روش عددی، خطای اندازه‌گیری در روش‌های تجربی، مسیری که جریان قبل از ورود به نازل طی کرده و عواملی نظیر زبری سطح داخلی نازل که بر این پارامترها تأثیرگذارند، می‌باشد.

جدول (۲): مقایسه کمی نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی

پارامتر	نتایج شبیه‌سازی	نتایج تجربی	خطا (%)
ضخامت لایه سیال (mm)	۰/۵۵	۰/۵	۱۰
زاویه اسپری (deg)	۸۰	۹۰	- ۱۱
سرعت متوسط مایع در دهانه خروجی (m/s)	۱۳	۱۳/۵	- ۴



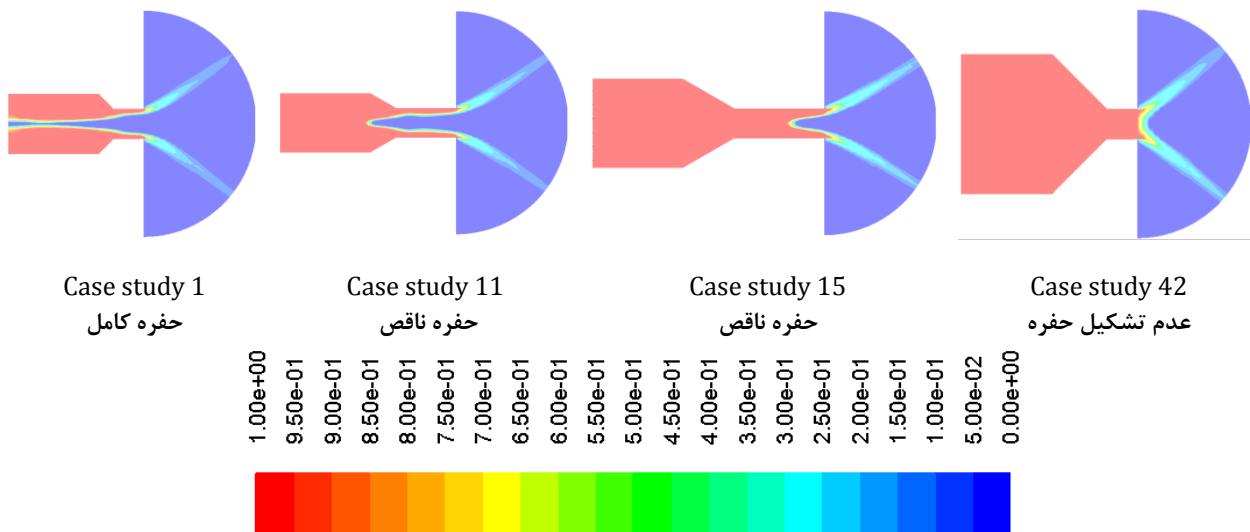
شکل (۵): فاکتورهای طراحی انژکتور جریان پیچشی

منزله سلول خالی از سوخت است. قابل مشاهده است که ستون گاز درون انژکتور با تغییر هندسه آن می‌تواند تا انتها شکل نگیرد که این مسئله سبب ناپایداری جریان درون انژکتور می‌شود و مطلوب نیست. اهمیت شکل‌گیری ستون گاز تا انتها در این است که سطح مشترک، پایداری داشته باشد و از آن مهم‌تر اینکه جریان پیچشی درون انژکتور قدرت کافی داشته باشد تا لایه سیال خروجی از انژکتور تا حد ممکن نازک شود و اتمیزاسیون بهتری حاصل شود.

شکل ۶ کانتورهای کسر حجمی سوخت برای چند حالت مختلف تحلیل پارامتریک (حفره هوای کامل، حفره هوای ناقص و حالت عدم تشکیل حفره) را نشان می‌دهد. کسر حجمی، یک پارامتر مهم در ارزیابی جریان‌ات دوفازی محسوب می‌شود زیرا نمایانگر 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 به‌منزله سلول پر و رنگ آبی به

جدول (۳): پارامترها و نتایج تحلیل پارامتریک

وضعیت تشکیل حفره گاز	نتایج تحلیل پارامتریک				پارامترها						
	دبی جرمی (g/s)	ضخامت لایه (mm)	زاویه اسپری (deg)	سرعت میانگین (m/s)	طول و قطر محفظه چرخش (mm)	طول به قطر نازل	طول به قطر مجرای ورودی	شعاع چرخش به شعاع نازل	شعاع چرخش به شعاع مجرای ورودی	زاویه پخ (deg)	مورد مطالعه
کامل	۶/۳۹	۰/۱۵۰	۶۱/۸	۳۱/۰۳	۲	۱	۱/۵	۱/۴	۲/۳۳	۹۰	۱
کامل	۶/۵۷	۰/۱۵۶	۶۰/۶	۱۹/۱۵	۲	۲	۱/۵	۱/۴	۲/۳۳	۹۰	۲
کامل	۶/۵۱	۰/۱۶۱	۵۸/۷	۱۸/۹۵	۲	۳	۱/۵	۱/۴	۲/۳۳	۹۰	۳
کامل	۶/۷۰	۰/۱۵۹	۶۶/۹	۳۱/۵۶	۲	۰/۵	۱/۵	۱/۴	۲/۳۳	۹۰	۴
ناقص	۵/۶۶	۰/۱۹۵	۵۷/۸	۱۳/۹۵	۳	۲	۱/۵	۲/۴	۴/۰۰	۹۰	۵
ناقص	۵/۶۴	۰/۱۹۷	۵۶/۳	۱۳/۶۷	۳	۳	۱/۵	۲/۴	۴/۰۰	۹۰	۶
ناقص	۵/۷۴	۰/۱۹۵	۶۶/۶	۱۵/۷۳	۳	۰/۵	۱/۵	۲/۴	۴/۰۰	۹۰	۷
عدم	۶/۱۱	۰/۴۶۲	۵۶/۶	۹/۳۰	۴	۲	۱/۵	۳/۴	۵/۶۷	۹۰	۸
عدم	۶/۱۱	۰/۵۰۰	۶۰/۸	۸/۴۳	۴	۳	۱/۵	۳/۴	۵/۶۷	۹۰	۹
عدم	۶/۱۷	۰/۵۰۰	۷۴/۹	۱۱/۲۰	۴	۰/۵	۱/۵	۳/۴	۵/۶۷	۹۰	۱۰
ناقص	۶/۶۸	۰/۱۶۵	۶۰/۹	۱۹/۶۶	۲	۲	۱/۵	۱/۴	۲/۳۳	۶۰	۱۱
ناقص	۶/۴۸	۰/۱۷۰	۵۶/۳	۱۸/۲۰	۲	۳	۱/۵	۱/۴	۲/۳۳	۶۰	۱۲
ناقص	۶/۷۳	۰/۱۶۹	۶۵/۴	۲۰/۴۰	۲	۰/۵	۱/۵	۱/۴	۲/۳۳	۶۰	۱۳
ناقص	۵/۸۶	۰/۲۰۵	۵۸/۷	۱۴/۳۵	۳	۲	۱/۵	۲/۴	۴/۰۰	۶۰	۱۴
ناقص	۵/۸۴	۰/۲۲۷	۵۵/۵	۱۳/۰۷	۳	۳	۱/۵	۲/۴	۴/۰۰	۶۰	۱۵
ناقص	۵/۹۳	۰/۲۱۹	۶۷/۵	۱۵/۵۹	۳	۰/۵	۱/۵	۲/۴	۴/۰۰	۶۰	۱۶
عدم	۶/۳۴	۰/۵۰۰	۶۵/۳	۹/۵۸	۴	۲	۱/۵	۳/۴	۵/۶۷	۶۰	۱۷
عدم	۶/۳۳	۰/۵۰۰	۶۴/۷	۹/۲۶	۴	۳	۱/۵	۳/۴	۵/۶۷	۶۰	۱۸
عدم	۶/۴۰	۰/۵۰۰	۷۶/۵	۱۱/۶۹	۴	۰/۵	۱/۵	۳/۴	۵/۶۷	۶۰	۱۹
کامل	۶/۴۹	۰/۱۵۷	۶۰/۷	۱۹/۰۳	۲	۲	۱/۵	۱/۴	۲/۳۳	۱۲۰	۲۰
کامل	۶/۵۱	۰/۱۶۰	۵۵/۵	۱۸/۵۹	۲	۳	۱/۵	۱/۴	۲/۳۳	۱۲۰	۲۱
کامل	۶/۵۹	۰/۱۵۸	۶۹/۸	۳۱/۳۱	۲	۰/۵	۱/۵	۱/۴	۲/۳۳	۱۲۰	۲۲
ناقص	۵/۵۹	۰/۱۹۱	۵۹/۷	۱۴/۱۵	۳	۲	۱/۵	۲/۴	۴/۰۰	۱۲۰	۲۳
ناقص	۵/۵۶	۰/۱۹۵	۵۵/۲	۱۳/۴۹	۳	۳	۱/۵	۲/۴	۴/۰۰	۱۲۰	۲۴
ناقص	۵/۶۷	۰/۲۰۳	۶۵/۷	۱۵/۶۹	۳	۰/۵	۱/۵	۲/۴	۴/۰۰	۱۲۰	۲۵
عدم	۶/۰۳	۰/۴۵۳	۶۷/۳	۹/۶۰	۴	۲	۱/۵	۳/۴	۵/۶۷	۱۲۰	۲۶
عدم	۶/۰۲	۰/۴۸۴	۶۲/۰	۸/۸۹	۴	۳	۱/۵	۳/۴	۵/۶۷	۱۲۰	۲۷
عدم	۶/۰۸	۰/۴۷۸	۷۳/۶	۱۰/۹۸	۴	۰/۵	۱/۵	۳/۴	۵/۶۷	۱۲۰	۲۸
کامل	۶/۲۰	۰/۱۵۶	۵۶/۷	۱۸/۸۱	۲	۲	۱/۵	۱/۴	۲/۳۳	۱۵۰	۲۹
کامل	۶/۲۸	۰/۱۶۱	۵۷/۳	۱۷/۶۹	۲	۳	۱/۵	۱/۴	۲/۳۳	۱۵۰	۳۰
کامل	۶/۴۸	۰/۱۵۴	۶۳/۸	۳۱/۶۴	۲	۰/۵	۱/۵	۱/۴	۲/۳۳	۱۵۰	۳۱
ناقص	۵/۵۹	۰/۱۹۱	۵۸/۲	۱۳/۹۹	۳	۲	۱/۵	۲/۴	۴/۰۰	۱۵۰	۳۲
ناقص	۵/۵۷	۰/۱۹۵	۵۲/۴	۱۳/۴۷	۳	۳	۱/۵	۲/۴	۴/۰۰	۱۵۰	۳۳
ناقص	۵/۶۶	۰/۲۰۵	۶۳/۴	۱۵/۴۵	۳	۰/۵	۱/۵	۲/۴	۴/۰۰	۱۵۰	۳۴
عدم	۶/۰۱	۰/۴۵۳	۶۵/۲	۹/۷۳	۴	۲	۱/۵	۳/۴	۵/۶۷	۱۵۰	۳۵
عدم	۶/۰۰	۰/۴۶۰	۶۲/۵	۸/۸۷	۴	۳	۱/۵	۳/۴	۵/۶۷	۱۵۰	۳۶
عدم	۶/۰۷	۰/۵۰۰	۷۷/۲	۱۱/۳۲	۴	۰/۵	۱/۵	۳/۴	۵/۶۷	۱۵۰	۳۷
کامل	۶/۳۵	۰/۱۵۱	۶۴/۳	۲۱/۲۷	۲	۱	۲	۱/۴	۲/۳۳	۹۰	۳۸
کامل	۶/۷۶	۰/۱۴۹	۶۳/۵	۲۱/۱۱	۲	۱	۱	۱/۴	۲/۳۳	۹۰	۳۹
کامل	۶/۹۶	۰/۱۵۶	۶۴/۰	۲۱/۴۵	۲	۱	۰/۵	۱/۴	۲/۳۳	۹۰	۴۰
ناقص	۵/۷۰	۰/۱۹۵	۶۰/۲	۱۵/۰۴	۳	۱	۱/۵	۲/۴	۴/۰۰	۹۰	۴۱
عدم	۶/۴۸	۰/۵۰۰	۷۶/۲	۱۰/۶۹	۴/۶	۱	۱/۵	۴	۶/۶۷	۹۰	۴۲
کامل	۶/۶۱	۰/۱۵۵	۶۳/۸	۲۱/۰۱	۲	۱	۱/۵	۱/۴	۲/۳۳	۶۰	۴۳
کامل	۶/۳۴	۰/۱۴۶	۶۴/۹	۲۰/۲۲	۲	۱	۱/۵	۱/۴	۲/۳۳	۱۲۰	۴۴
کامل	۶/۴۳	۰/۱۴۶	۶۱/۷	۲۰/۵۱	۲	۱	۱/۵	۱/۴	۲/۳۳	۱۵۰	۴۵



شکل (۶): کانتور کسر حجمی سوخت برای چند حالت مختلف تحلیل پارامتریک (حفره هوای کامل، حفره هوای ناقص و عدم تشکیل حفره)

خروجی دارد به طوری که اثر آن قابل صرف نظر کردن است. اما زاویه پخ ورودی به نازل بر روی زاویه مخروط اسپری خروجی، اثرگذار است بدین صورت که به ازای زوایای پخ خیلی باز (بیش از ۱۲۰ deg)، زاویه مخروط اسپری دچار کاهش می شود و کوچک ترین زاویه مخروط به ازای زاویه پخ بزرگ تر حاصل می گردد. لازم به ذکر است به ازای زوایای پخ کوچک تر از ۱۲۰ deg، کوچک تر کردن زاویه پخ، با نرخ کمتری زاویه اسپری را بزرگ تر می کند.

۳-۲-۴- اثر نسبت شعاع گردش به شعاع نازل و شعاع مجرای ورودی

اثر قطر و طول محفظه گردش به نوعی در پارامترهای نسبت شعاع گردش به شعاع نازل و شعاع مجرای ورودی نهفته است. نتایج نشان داد که بیشترین تأثیر را بر روی مشخصات اسپری خروجی از انژکتور، نسبت شعاع گردش (چرخش) سیال به شعاع نازل و شعاع مجرای ورودی، دارند. کمینه دبی جرمی سیال ورودی به ازای نسبت شعاع گردش به شعاع نازل برابر ۲/۴ و نسبت شعاع گردش به شعاع مجرای ورودی برابر ۴، محقق می گردد. در حالیکه با مقادیر بیشتر یا کمتر از مقادیر فوق، بر میزان نرخ دبی جرمی افزوده می شود. اینجا دقیقاً شرایطی است که در آن ضخامت لایه سیال خروجی کمینه می شود. همچنین بیشینه دبی جرمی سیال ورودی به ازای نسبت شعاع گردش به شعاع نازل برابر

۳-۲-۱- اثر نسبت طول به قطر نازل

نتایج نشان داد که نسبت طول به قطر نازل، اثر چندانی بر مقدار نرخ دبی جرمی خروجی از انژکتور ندارد و می توان از تأثیر آن صرف نظر نمود. همچنین نسبت طول به قطر نازل اثر چندانی بر ضخامت لایه سیال خروجی از این نوع انژکتور ندارد و بنابراین می توان از تأثیر آن چشم پوشی نمود. هرچقدر نسبت طول به قطر نازل کوچک تر باشد، زاویه مخروط اسپری بزرگ تر می شود و بالعکس. هر چقدر که نسبت طول به قطر نازل بزرگ تر باشد سرعت میانگین لایه سیال خروجی از انژکتور کمتر می شود و بالعکس.

۳-۲-۲- اثر نسبت طول مجرای ورودی به قطر مجرا

نتایج نشان داد که نسبت طول به قطر مجرای ورودی، تأثیر اندکی بر روی میزان نرخ دبی جرمی خروجی دارد به طوری که قابل صرف نظر کردن است. همچنین اثر نسبت طول به قطر مجرای ورودی بر روی ضخامت لایه سیال خروجی از این نوع انژکتور، زاویه مخروط اسپری و سرعت میانگین لایه سیال خروجی از این نوع انژکتور، ناچیز است.

۳-۲-۳- اثر زاویه پخ ورودی به نازل

نتایج نشان داد که زاویه پخ ورودی به نازل، تأثیر ناچیزی بر روی میزان نرخ دبی جرمی خروجی، ضخامت لایه سیال خروجی از این نوع انژکتور و سرعت میانگین لایه سیال

سرعت میانگین لایه سیال خروجی دارد. اما زاویه پخ ورودی به نازل بر روی زاویه مخروط اسپری خروجی، اثرگذار است. نتایج نشان داد که بیشترین تأثیر را بر روی مشخصات اسپری خروجی، نسبت شعاع گردش (چرخش) سیال به شعاع نازل و به شعاع مجرای ورودی، دارند. کمینه دبی جرمی سیال ورودی به ازای یک نسبت شعاع گردش به شعاع نازل خاص و نسبت شعاع گردش به شعاع مجرای ورودی خاص، محقق می‌گردد. اینجا دقیقاً شرایطی است که در آن ضخامت لایه سیال خروجی کمینه می‌شود. زاویه اسپری خروجی نیز وقتی بیشینه می‌شود که نسبت شعاع گردش به شعاع نازل و نسبت شعاع گردش به شعاع مجرای ورودی بالا باشد. سرعت میانگین کمینه نیز در نسبت‌های بالای شعاع گردش سیال به شعاع نازل و به شعاع مجرای ورودی محقق می‌گردد. این در حالی است که سرعت میانگین بیشینه در نسبت‌های کوچک شعاع گردش سیال به شعاع نازل و به شعاع مجرای ورودی به دست می‌آید.

۵- مراجع

1. Yang, A.S. "Satellite Hydrazine Propulsion System Design Trades", J. Da-Yeh University, Vol. 10, No. 1, pp. 41-50, 2001.
2. Bayvel, L. and Orzechowski, Z. "Liquid Atomization", 1th ed, Taylor & Francis., NY, USA, 1993.
3. Buelow, Ph. E. O., Mao, Ch., Smith, S., and Bretz, D. "Two-phase Computational Fluid Dynamics Analysis Applied to Prefilming Pure-Airblast Atomizer" J. Propuls. Power, Vol. 19, No. 2, pp. 235-241, 2003.
4. El-Sayed Negeed, R., Hidaka, S., Kohno, M., and Takata, Y. "Experimental and Analytical Investigation of Liquid Sheet Breakup Characteristics", Int. J. Heat Fluid Flow, Vol. 32, No. 1, pp. 95-106, 2011.
5. Huh, K. Y. and Gosman, A.D. "A Phenomenological Model of Diesel Spray Atomization", International Conference on Multiphase Flows, Tsukuba, Japan, pp. 515-518, 1991.
6. Sarre, C.K., Kong, S.C., and Reitz, R.D. "Modeling the Effects of Injector Nozzle Geometry on Diesel Sprays", Journal of Engines SAE Congress SAE Transactions, Vol. 108, No. 3, pp. 199-205, 1999.
7. Klein, M. and Sadiki, A. "A Digital Filter Based Generation of Inflow Data for Spatially Developing Direct Numerical or Large Eddy

و نسبت شعاع گردش به شعاع مجرای ورودی برابر $1/4$ ، محقق می‌گردد. اینجا دقیقاً شرایطی است که در آن ضخامت لایه سیال خروجی بیشینه می‌شود. زاویه اسپری خروجی نیز وقتی بیشینه می‌شود که نسبت شعاع گردش به شعاع نازل و نسبت شعاع گردش به شعاع مجرای ورودی برابر بالاترین مقدار ممکن شود. به ازای مقادیر کمتر از $2/4$ برای نسبت شعاع گردش به شعاع نازل و کمتر از 4 برای نسبت شعاع گردش به شعاع مجرای ورودی، زاویه اسپری خروجی با نرخ خیلی کمی کاهش خواهد داشت و تقریباً می‌توان گفت که تفاوت چندانی در زاویه اسپری خروجی دیده نمی‌شود. سرعت میانگین کمینه نیز در نسبت‌های هرچه بالاتر برای نسبت شعاع گردش سیال به شعاع نازل و به شعاع مجرای ورودی محقق می‌گردد. این در حالی است که سرعت میانگین بیشینه در نسبت‌های کوچک برای نسبت شعاع گردش سیال به شعاع نازل و به شعاع مجرای ورودی (به ترتیب $1/4$ و $2/3$ و مقادیر کمتر از آن) به دست می‌آید.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر هندسه داخلی انژکتور سوخت یک رانشگر تک‌مولفه‌ای هیدرازینی ۱۰ نیوتنی بر مشخصه‌های لایه سیال خروجی از آن به کمک شبیه‌سازی جریان داخلی آن ارائه شد. جریان داخلی این انژکتور ترکیبی از دو جریان مختلف جدای از هم با سطح تماس مشترک و در فازهای مایع و گاز است. با بررسی پارامتریک تأثیر هندسه بر مشخصه‌های لایه سیال خروجی مشخص شد که نسبت طول به قطر نازل، اثر چندانی بر مقدار نرخ دبی جرمی خروجی از انژکتور و ضخامت لایه سیال خروجی ندارد. هرچقدر نسبت طول به قطر نازل کوچک‌تر باشد، زاویه مخروط اسپری بزرگ‌تر می‌شود و بالعکس. هر چقدر که نسبت طول به قطر نازل بزرگ‌تر باشد سرعت میانگین لایه سیال خروجی از انژکتور کمتر می‌شود و بالعکس. نتایج نشان داد که اثر نسبت طول به قطر مجرای ورودی بر روی میزان نرخ دبی جرمی، ضخامت لایه سیال خروجی از این نوع انژکتور، زاویه مخروط اسپری و سرعت میانگین لایه سیال خروجی، ناچیز است. نتایج نشان داد که زاویه پخ ورودی به نازل، تأثیر ناچیزی بر روی میزان نرخ دبی جرمی خروجی، ضخامت لایه سیال خروجی از این نوع انژکتور و

13. Hosseinalipour, S. M. and Karimaei, H. "A New Model Based on Coupling of MEP/CFD/ILIA for Prediction of Primary Atomization", *Can J Chem Eng*, Vol. 94, No. 4, pp. 792-802, 2016.
14. Hosseinalipour, S. M., Karimaei, H., Movahednejad, E., and 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*, Vol. 8, No. 3, pp. 205-216, 2016.
15. Asgari Mahdavi, S., ommi, F., and Movahednejad, E. "Analytical Study of the Effects of Air Swirl Flow on Spray Atomization", *Aerospace Mechanics*, Vol. 10, No. 2, pp. 45-55, 2014. (in Persian)
16. Karimaei, H. "Design and Simulation of Fuel Injector of a 10N Monopropellant Hydrazine Thruster", *J. Space Sci. . Tech.*, Vol. 11, No. 2, pp. 59-65, 2018. (in Persian)
17. Karimaei, H., Naseh, H., Salimi, M. R., and Jokari, E. "Design of Physical Configuration of a 10N Monopropellant Hydrazine Thruster", *J. Space Sci. Tech.*, Vol. 12, No. 1, pp. 13-22, 2017. (in Persian)
18. Akbari, N. "Experimental and Analytical Study of Performance Characteristics of Pressure-Swirl Duplex Injector", *J. Mech. Eng.*, Vol. 49, No. 3, pp. 29-37, 2020. (in Persian)
8. Trinh, H.P., Chen, C.P., and Balasubramanyan, M.S. "Numerical Simulation of Liquid Jet Atomization Including Turbulence Effects", *J. Eng. Gas Turbine. Power*, Vol. 129, No. 4, pp. 920-928, 2007.
9. Trinh Huu, P., "Modeling of Turbulence Effect on Liquid Jet Atomization, Phuoc ProQuest", *Dissertations and Theses (Ph.D.)*, The University of Alabama in Huntsville, US, 2004.
10. Trinh Huu, P. and Chen, C. P. "Modeling of Turbulence Effects on Liquid Jet Atomization and Breakup", *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, US, pp. 154-160, 2005.
11. Hosseinalipour, S. M., Karimaei, H., and Ghorbani, R. "Study the Y-atomizer Performance of a Power Plant in Order to Extract Mean Droplet Diameter Range", *2nd proceeding of gas turbine*, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, May 2013, pp. 144-151. (in Persian)
12. Hosseinalipour, S. M., Karimaei, H., and Ommi, F. "Numerical Study the Effect of Mass flow Rate on Liquid Sheet Properties Resulting From a Swirl Injector", *3rd proceeding of gas turbine*, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, pp. 120-127, May 2014. (in Persian)