

طراحی و شبیه‌سازی انژکتور سوخت یک میکرو رانشگر تک مؤلفه‌ای هیدرازینی با پیشران ۱۰ نیوتن

حدیثه کریمایی*

۱- پژوهشگاه هوافضا، گروه علوم فضایی، وزارت علوم تحقیقات و فناوری

*تهران، کدپستی: ۱۴۶۵۷۷۴۱۱۱

karimaei@ari.ac.ir

رانشگرهای هیدرازینی، پرکاربردترین رانشگرهای سامانه‌های هدایت و کنترل محموله‌های بازگشتی و محموله‌های سرشنین‌دار محسوب می‌شوند. در این مقاله، طراحی و محاسبات یک انژکتور اسپری مخروطی با دو ورودی مماسی به عنوان انژکتور سوخت یک رانشگر تک مؤلفه‌ای هیدرازینی با پیشران ۱۰ نیوتن، ارائه شده است. این انژکتور براساس روش بازارف، به گونه‌ای طراحی شد که یک زاویه پاشش متوسط (نه چندان بزرگ) و ضخامت لایه خیلی کم به دست می‌دهد که با توجه به محدودیت طول محفظه کاتالیستی مناسب بوده و پودرسازی ریزتری به دست می‌آید. پدیده ایجاد و توسعه حفره هوا در جریان داخلی این نوع انژکتورها و شبیه‌سازی آن، به دلیل وجود دو جریان پیشی آشفته در دو فاز مختلف مایع و گاز که دارای سطح آزاد مشترکند، پیچیده است. برای این انژکتور، شبیه‌سازی جریان داخلی به منظور پیش‌بینی مشخصه‌های جریان خروجی و اطمینان از شکل‌گیری حفره گاز درون آن انجام گرفت. این مشخصه‌ها شامل زاویه مخروط پاشش، ضخامت لایه سیال خروجی، توزیع سرعت خروجی و غیره است. بدین منظور از روش حجم سیال (VOF) استفاده شد و آشفتگی جریان نیز با استفاده از مدل $k-\epsilon$ شبیه‌سازی شد. شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزارهای انسیس - ورک‌بنچ و انسیس - فلونتنت انجام شد. با بررسی نتایج، این اطمینان حاصل شد که انژکتور طراحی شده، دبی جرمی مورد نظر را در اختلاف فشار معین طراحی می‌تواند تأمین کند و حفره هوا نیز به طور کامل تا انتها شکل می‌گیرد. همچنین زاویه پاشش مورد نظر نیز توسط آن تأمین می‌شود. از این رو ابعاد نهایی برای ساخت و استفاده در رانشگر تک مؤلفه ۱۰ نیوتنی انتخاب شدند.

واژه‌های کلیدی: انژکتور، رانشگر تک مؤلفه‌ای، مخروط اسپری، کم‌پیشران

مقدمه

موتورهای تک مؤلفه بیشتر به عنوان زیرسیستم تعیین وضعیت و تثبیت مداری در ماهواره‌ها و فضاپیماها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در رانشگرهای تک مؤلفه‌ای، واکنش احتراق با عبور جریان پیشران از محفظه کاتالیست صورت می‌پذیرد. رانشگرهای تک مؤلفه‌ای در سیستم‌های پیشران ماهواره‌ها با هدف انجام ماموریت‌هایی نظیر کنترل ارتفاع و وضعیت ماهواره لازم بوده و بسیار استفاده می‌شود [1]. در داخل کشور این نوع رانشگر طراحی و ساخته نشده است و نیز بدلیل استراتژیک بودن این المان و مشکلات تحریم، کشورهای دیگر در اختیار ما قرار نمی‌دهند. رانشگر تک مؤلفه‌ای شامل شیر کنترل جریانی، سیستم پاشش، کاتالیست، محفظه یا بستر

علائم و اختصارات

$\dot{m}_{\phi D}$	دبی واقعی انژکتور
μ_{ϕ}	ضریب دبی
F_c	سطح مقطع نازل انژکتور
Δp_{ϕ}	اختلاف فشار دو طرف انژکتور
ρ_*	چگالی سیال
$\dot{m}_{\phi I}$	دبی ایده‌آل انژکتور
p_{Bx}	فشار سیال در راه ورودی
p_B	فشار در سمت خروجی
A	مشخصه هندسی انژکتور

۱. استادیار (نویسنده مخاطب)

تخمین مقیاس زمانی اتمیزاسیون بکار بردند. آنها تأثیر کاویتاسیون را در نظر نگرفتند.

سار^۶ ۱۹۹۹ [۸] مدل جریان سیال در نازل را به منظور شبیه‌سازی تأثیر هندسه نازل بر فرآیند اسپری در کد کیوا^۷ ایجاد کرد. روش او مشخصه‌های جریان را پیش‌بینی می‌کرد. این مدل، پارامترهایی چون شکل ورودی راهگاه، افت مسیر، کاویتاسیون و فشار پاشش را مورد توجه قرار داده و ضریب عبور جریان انژکتور، سرعت مؤثر خروجی و اندازه قطرات اولیه را محاسبه می‌کرد. این مدل با مدل شکست موج، کوپل شد تا شرایط به آزمایش نزدیکتر شود. هاو و گسمن^۹ ۱۹۹۱ [۹] 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 کلین-هلمهولتز رشد می‌کنند. بر اساس نظر هاو و گسمن مقیاس طولی اتمیزاسیون دو برابر مقیاس آشفتگی می‌باشد. کلین^۸ ۲۰۰۳ [۱۰] مشخصه‌های سرعت جریان خروجی از نازل و آشفتگی آن را با دو روش مدل کرد. در روش اول از شبیه‌سازی عددی مستقیم جت معشوش صفحه‌ای استفاده کرد و تأثیر جریان داخلی نازل را بررسی کرد. در روش دوم اتمیزاسیون را مستقل از جریان داخلی 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^۹ و چن^۸ ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷ [۱۱ و ۱۳] در مدلی که برای شکست اولیه توسعه دادند، هر دوی مقیاس‌های زمانی و طولی اغتشاشات موجی سطح و حرکت آشفتگی را به طریقی تلفیق کردند که سهم هر کدام در مکانیزم شکست به وسیله انرژی جنبشی وزن داده شد. آنها مشاهده کردند مقادیر آشفتگی اولیه یک نقش کلیدی روی گسیختگی جت بازی می‌کند. مقادیر آنها از هندسه و شرایط جریان نازل بدست می‌آید.

اندرکنش یک اسپری با یک میدان جریان آشفته با یک روش ترکیبی تجربی- عددی توسط بورداس و همکاران^۸ ۲۰۱۲ [۱۴]، مورد بررسی قرار گرفته است. یک حلگر جدید مبتنی بر روش VOF برای جریان دو فازی توسعه داده شد. این حلگر بعداً توسط ردی و بانرجی^۸ ۲۰۱۵ [۱۵]، برای تحلیل شکست اولیه یک جت مایع صفحه‌ای دو بعدی در معرض جریان گاز همجهت، مورد استفاده قرار گرفت. در محاسبات گروشازن و همکاران^۸ ۲۰۱۵ [۱۶]، مدل VOF برای شکست اولیه یا ردیابی لاگرانژی ذرات LPT با

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 اینرو انژکتور به عنوان یک المان مهم در این تکنولوژی برای پودر نمودن سوخت عمل می‌کند.

فرآیند قطره‌سازی^۲ را می‌توان فرآیندی که در آن حجمی از مایع به تعداد زیاد قطره تبدیل می‌شود تعریف کرد. 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 به صورت یک اسپری مخروطی شکل توخالی پخش می‌شود [۲]. برای درک بهتر یک فرآیند اتمیزاسیون، انجام مدل‌سازی عددی در کنار آزمایشات جامع تجربی از دو دهه قبل رایج شده است. با توجه به مطالعات چاین^۳ ۲۰۰۰ [۳]، کوپر و یول^۳ ۲۰۰۱ [۴]، 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 اینرو 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. بیلو و همکارانش^۳ ۲۰۰۳ [۲] جریان دوفازی داخل نوعی انژکتور هوادمشی^۳ را به صورت 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^۳ ۲۰۱۱ [۶] 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 چند فازی درون نازل را با اسپری مرتبط سازند. این مطالعات ناچاراً همگی نیمه‌تجربی هستند. برای مثال هاو^۴ و گسمن^۵ ۱۹۹۸ [۷] تلاش کردند تا میزان آشفتگی در خروجی نازل را به کمک زاویه اسپری بدست آورند. آنها رشد امواج و مقیاس طولی آشفتگی را بطور خطی با یکدیگر تلفیق کرده تا مقیاس طولی اتمیزاسیون را بدست آورند. به طور مشابه آشفتگی و مقیاس زمانی رشد امواج را برای

6. Sarre
7. Kiva II
8. Klein
9. Trinh

2. Atomization
3. Airblast
4. Huh
5. Gosman

بهینه انژکتور توسط آن‌ها تعیین می‌شود که عبارتند از [۲ و ۲۲]:
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:

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

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. ضریب دبی در صنعت برای انژکتورهای جریان پیچشی بین ۰/۱ تا ۰/۴ 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.

$$\dot{m}_{\phi I} = W_T \cdot \rho_* \cdot F_c \quad (3)$$

مطابق با معادله برنولی، رابطه زیر بین سرعت سیال خروجی از انژکتور و اختلاف فشار دو طرف انژکتور برقرار است.

$$W_T = \sqrt{\frac{2 \Delta p_{\phi}}{\rho_*}} \quad (4)$$

رابطه (۱) نیز از ترکیب روابط (۲)، (۳) و (۴) به دست آمده است.
۳. اختلاف فشار بین دو سر انژکتور (Δp_{ϕ}) یکی از پارامترهای مهم طراحی است که مقدار آن برای انواع انژکتور متفاوت است.

$$\Delta p_{\phi} = p_{BX} - p_B \quad (5)$$

در این رابطه 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 پیچشی در صنعت بین ۲ تا ۱۵ بار است. به همین ترتیب، مشخصات انژکتور (دبی جرمی جریان، ضریب دبی و زاویه چتر پاشش) تابعی از اختلاف فشار بین دو طرف انژکتور است.

۴. زاویه چتر پاشش ($2\alpha_p$) که تابعی از اختلاف فشار است و مقدار آن برای انژکتورهای جریان پیچشی صنعتی بین ۶۰ تا ۱۲۰ درجه است.

معادلات اساسی طراحی

اساس طراحی انژکتورهای جریان پیچشی بر مبنای گردش سیال مایع به دور محفظه انژکتور است که برای انژکتور مورد مطالعه به صورت مماسی است. معادلات اساسی طراحی انواع انژکتورهای

مدل شکست قطرات در شرایطی که قطرات مایع در معرض گاز محیط قرار داشتند، استفاده شد.

موحدنژاد و همکاران [۱۷] ۲۰۱۰ با استفاده از روش هاو و گسمن، آشفستگی جریان نازل را تخمین زده و آن را در روش ماکزیمم آنتروپی لحاظ نمودند. حسینی‌پور و همکاران [۱۸] ۲۰۱۳ به کمک تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی، عملکرد یک انژکتور دوفازی Y شکل را که به عنوان انژکتور سوخت مازوت در نیروگاه استفاده می‌شد بررسی نمودند. آنها از روش حجم سیال برای پیدا کردن سطح مشترک مازوت و بخار در داخل انژکتور استفاده نمودند. حسینی‌پور و همکاران [۱۹] ۲۰۱۴ به کمک تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی، تاثیر دبی جرمی سوخت را بر روی مشخصه‌های لایه سیال خروجی از یک نوع انژکتور جریان پیچشی بررسی نمودند و نشان دادند که چگونه ضخامت لایه سیال خروجی و همچنین زاویه بازشدگی مخروط پاشش با دبی جرمی تغییر می‌کند. حسینی‌پور و کریمائی [۲۰ و ۲۱] برای اولین بار اثر هندسه داخلی انژکتور را به کمک نتایج تحلیل جریان داخلی آن به توزیع پاشش مرتبط نمودند.

در مقاله حاضر، روند طراحی انژکتور سوخت یک رانشگر تک‌مولفه‌ای هیدرازینی بر اساس روش بایول^{۱۰} [۲] ارائه شده است. این انژکتور از نوع جریان پیچشی با دو ورودی مماسی می‌باشد. سپس مدلسازی و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی برای آن انجام شد و مشخصه‌های لایه سیال خروجی از انژکتور استخراج شد. هدف از مدلسازی جریان داخلی انژکتور در مقاله حاضر، اطمینان یافتن از این است که ستون گاز میان انژکتور تا انتهای آن شکل گرفته باشد و همچنین مشخصه‌های مورد نیاز تامین شده باشد. در تکرارهای طراحی^{۱۱} 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.

طراحی انژکتور

شامل اصول طراحی، معادلات اساسی طرح و محاسبات طرح است که در ادامه هریک به تفصیل شرح داده می‌شود.

اصول طراحی

پارامترهای اساسی طراحی انژکتور شامل موارد زیر است که عملکرد

10. Bayvel

11. Design iteration

جریان پیچشی به شرح زیر است [۲][۲]:

۱. معادله بقای اندازه حرکت یا تکانه

۲. معادله برنولی یا بقای انرژی

مشخصه هندسی انژکتور (A) نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A = \frac{R_Z \cdot r_c}{n \cdot r_{BX}^2} \quad (۶)$$

که در این رابطه، n تعداد راه‌های ورودی، R_Z شعاع محور راهه ورود سیال، r_c شعاع نازل خروجی، و r_{BX} شعاع راهه ورودی است. مشخصه هندسی انژکتور (A) در واقع حلقه رابط بین سرعت محوری و سرعت محیطی است و نشان‌دهنده میزان گردش سیال در داخل انژکتور است. سایر مشخصه‌های انژکتور بستگی به مشخصه هندسی انژکتور دارند که مقادیر آن‌ها در نمودار شکل ۱ ترسیم شده است. هر انژکتور ساخته شده دارای مشخصه هندسی ثابتی است که مقدار آن بستگی به تعداد راهه ورودی، شعاع راهه ورودی، شعاع نازل خروجی و شعاع گردش سیال در انژکتور دارد.

فاکتورهای مهم طراحی انژکتور جریان پیچشی عبارت است از [۲] و [۲۲]:

• فاصله راهه ورود تا نازل خروج (h)

• نسبت طول نازل به قطر نازل (l_c / d_c)

• نسبت طول راهه ورود به قطر راهه (l_{BX} / d_{BX})

• نسبت شعاع گردش سیال به شعاع دهانه نازل (R_Z / r_c)

• تعداد راهه ورودی (n)

• زاویه پخ ورودی به نازل (2ψ)

این پارامترها در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. بعضی از آنها به صورت تجربی پیشنهاد شده‌اند که در منبع [۲] و [۲۲] موجودند.

محاسبات طراحی

معلومات برای طراحی شامل موارد زیر است:

• دبی خروجی از انژکتور \dot{m}_θ

• چگالی سیال ρ^*

• گرانشی سینماتیکی ν^*

• گرانشی دینامیکی μ^*

مجهولات طراحی (سایر مشخصه‌های انژکتور) نیز به ترتیب

زیر محاسبه می‌شوند.

• مشخصه هندسی انژکتور (A)

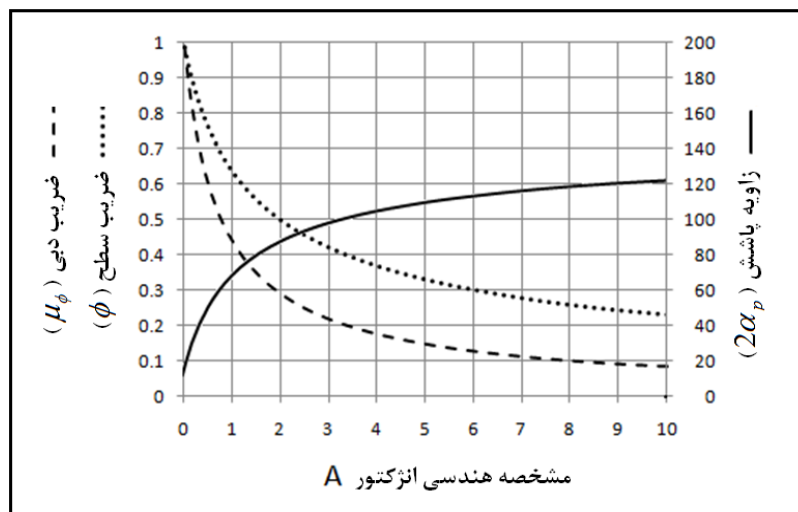
مقدار زاویه پاشش به دلخواه طراح انتخاب می‌شود و با توجه به نمودار شکل ۱، مشخصه هندسی انژکتور، ضریب سطح و ضریب دبی به دست می‌آید. در اینجا، زاویه پاشش ۱۰۰ درجه در نظر گرفته شد.

• شعاع نازل انژکتور (r_c)

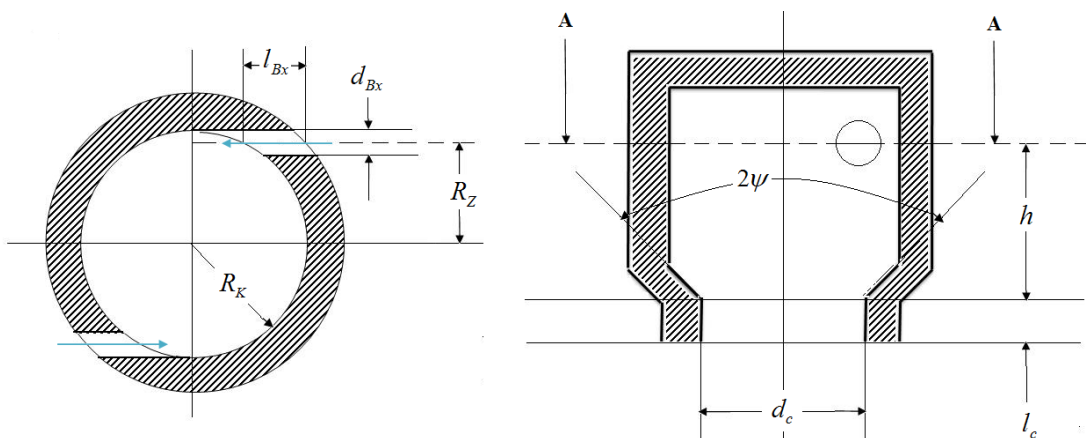
اختلاف فشار دو سر انژکتور در اینجا برابر ۵ بار نسبی در نظر گرفته شد. می‌توان از رابطه (۱) شعاع نازل انژکتور (r_c) را به دست آورد.

• شعاع راهه‌های ورودی سیال (r_{BX})

شعاع راهه ورودی سیال (r_{BX}) از رابطه (۶) به دست می‌آید. در اینجا، دو راهه ورودی برای انژکتور در نظر گرفته شد. زیرا در صورت افزایش تعداد راهه‌ها، قطر آنها خیلی کوچک می‌شد، از اینرو مشکلات ساخت سبب شد تا تا انژکتور به صورت دوراهه طراحی شود.



شکل ۱- ضریب دبی (μ_θ)، ضریب سطح (ϕ) و زاویه میانگین چتر پاشش ($2\alpha_p$) برحسب مشخصه هندسی انژکتور جریان پیچشی



شکل ۲- فاکتورهای طراحی انژکتور جریان پیچشی

معادل 0.065 kg/s در اختلاف فشار ۵ بار نسبی در دو سر انژکتور با زاویه مخروط اسپری 70° درجه می‌باشد. فرآیند طراحی این انژکتور، به صورت یک کد کامپیوتری تهیه شد و سپس بر اساس ورودی‌های مناسب طراحی، ابعاد اصلی انژکتور از آن استخراج شد. لازم به ذکر است که ابعاد، پس از انجام شبیه‌سازی جریان داخلی و با چندین تکرار تحلیل با ایجاد تغییرات کوچکی در ابعاد برای رسیدن به مشخصه‌های مورد نظر اسپری و همچنین اطمینان یافتن از شکل گرفتن کامل حفره گاز درون انژکتور، نهایی شدند.

جدول ۱- معلومات طراحی انژکتور

دبی جرمی \dot{m}_ϕ (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)
≈ 0.065	۱۰۲۱	$1/0.015-6$	$0.9e-3$

جدول ۲- برخی مجهولات کلیدی بدست آمده از محاسبات طراحی

قطر نازل انژکتور r_c (mm)	قطر راهه‌های ورودی r_{Bx} (mm)	قطر و طول محفظه پیچش D_K و h (mm)
۱.۰	۰.۶	۲.۰

در خصوص تعیین مقدار دبی جرمی باید گفت، با توجه به اینکه ضربه ویژه (ایمپالس) هیدرازین و همچنین نیروی پیشران، مشخص می‌باشند، می‌توان مقدار دبی جرمی تزریق سوخت را محاسبه نمود. مقدار دبی جرمی از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۳]:

$$\dot{m} = \frac{F^{(kg)}}{I_s^{(s)}} \quad (8)$$

با استفاده از رابطه فوق، مقدار دبی جرمی با لحاظ 15% حاشیه اطمینان طراحی، معادل 0.065 kg/s یا $6/5$ گرم بر ثانیه محاسبه شد.

- طول راهه ورودی (l_{Bx})
- طول راهه ورودی تقریباً همان ضخامت دیواره انژکتور است و انتخاب نسبت l_{Bx} / d_{Bx} به عهده طراح است.
- قطر محفظه^{۱۲} پیچش انژکتور (D_K)
- مقدار شعاع محفظه برابر است با:

$$R_K \approx R_Z + r_{Bx} \quad (9)$$

- طول نازل (l_c)
- این مقدار با تعیین نسبت l_c / d_c توسط طراح تعیین می‌شود، اما نسبت حدود ۱ پیشنهاد می‌شود.

- زاویه پخ نازل (2ψ)
- مقدار زاویه شیب دهانه ورودی نازل توسط طراح انتخاب می‌شود.
- طول محفظه پیچش (h)
- مقدار فاصله محور راهه ورودی سیال تا سر نازل خروجی انژکتور تقریباً با قطر محفظه (D_K) برابر فرض می‌شود.

با انجام این مراحل، انژکتور جریان پیچشی یک پایه مورد نظر بر اساس معلومات جدول ۱ طراحی شد و تغییرات فاکتورهای مهم طراحی برای بهینه‌سازی در محدوده مجاز توسط طراح انجام شد. برخی از مجهولات کلیدی در طراحی این انژکتور، که به کمک روش فوق محاسبه شده‌اند، در جدول ۲ ارائه شده‌اند. شماتیک انژکتور طراحی شده در نرم‌افزار سالید ورک^{۱۳} که به صورت ماژولار (دو تکه) تهیه شده است به صورت شکل ۳ می‌باشد. این انژکتور درون یک رانشگر تک پیش‌رانه کاتالیستی ۱۰ نیوتنی به صورت شکل ۴ جانمایی خواهد شد.

این انژکتور تک پایه می‌باشد و فقط ورودی یک نوع سیال را دارد، اما عملکرد آن به دلیل تشکیل حفره هوا درون آن به صورت دوفازی است. دبی جرمی عبوری از این انژکتور در این کاربری،

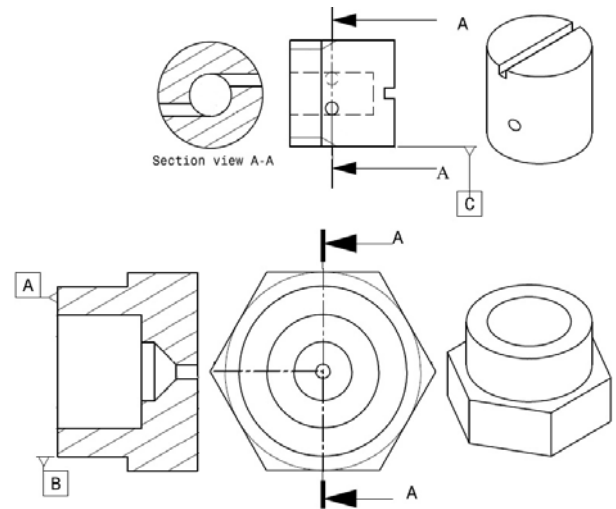
12. Swirl chamber
 13. Solid Work

مختلف می‌تواند وجود داشته باشد [24]. برای سلول خالی از سیال q^{th} ، سلول پر از سیال q^{th} و 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^{۱۶} 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:

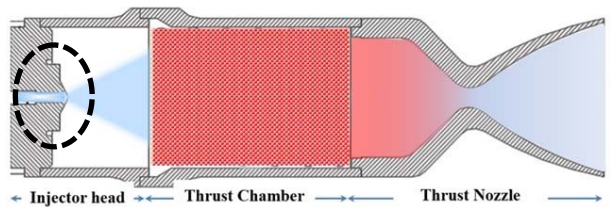
$$\sum_{q=1}^n f_q = 1 \quad (9)$$

شکل ۵ هندسه شبکه‌بندی شده انژکتور با دو ورودی مماسی را در راستای طولی و عرضی به کمک نرم افزار ورک‌بنچ 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^{۱۷} انجام گرفت. استقلال از مش‌بندی برای این هندسه بررسی شد و در نهایت نتیجه گرفته شد که تعداد ۲۰۰ هزار سلول محاسباتی در حوزه حل کافی می‌باشد. در واقع با ریز کردن مش از ۲۰۰ تا ۲۲۵ هزار، تغییری در پاسخ حاصل نشد، از اینرو تعداد ۲۰۰ هزار مش در دامنه حل نهایی شد. این بررسی برای یکی از پارامترهای مهم مورد بررسی (میزان کسر حجمی سوخت) در شکل ۶ نشان داده شده است. یک شبکه لایه مرزی هفت لایه نیز به مدل اعمال شد.

معادلات حاکم (ناویر-استوکس) توسط نرم‌افزار آنسیس فلونت ۱۵ حل شدند. در اینجا، اثرات آشفتگی با روش دومعادله‌ای K-ε از نوع RNG شبیه‌سازی شد. شرایط مرزی بدین صورت است که در مرز خروجی (محیط اطراف) اختلاف فشار صفر منظور شده است. در ورودی (دو راهه 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 صرف-نظر شده است. جریان به صورت سه‌بعدی، پایا، آشفتگی و تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شد.



شکل ۳ - طرح‌واره انژکتور طراحی شده برای رانش گر تک پیش‌رانه کاتالیستی



شکل ۴ - طرح‌واره‌ای از یک رانش گر تک پیش‌رانه کاتالیستی

شبیه‌سازی انژکتور

شامل مدل عددی و نتایج تحلیل است که در ادامه هر یک شرح داده می‌شود.

مدل عددی

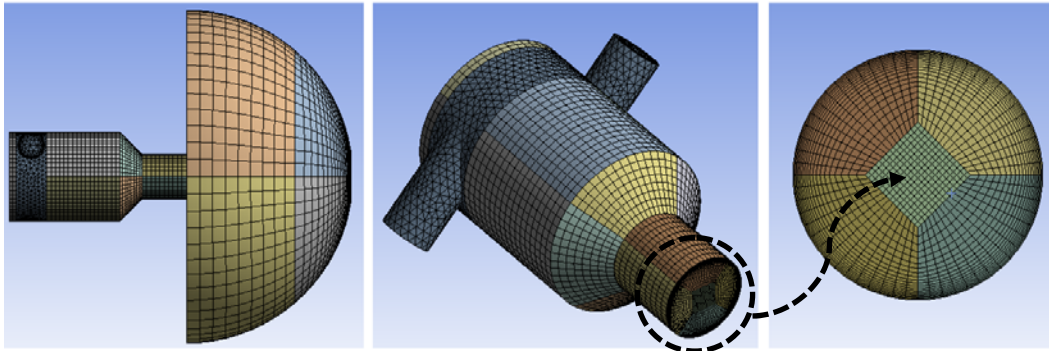
سطح مشترک بین یک مایع و یک گاز به اصطلاح سطح آزاد^{۱۴} نامیده می‌شود. در پدیده پاشش یک سوخت مایع و پودر شدن آن، مرز بین لایه مایع و هوا یک سطح آزاد است. بنابراین، باید از روش‌های عددی مخصوص بررسی سطح آزاد بین مایع و گاز استفاده کرد. از آنجا که در انژکتور مورد نظر، جریان دوفازی است، برای تحلیل آن نیاز به استفاده از یک مدل جریان دوفازی است. خصوصیات این دو فاز که در اینجا سوخت هیدرازین و هوا می‌باشد به نرم‌افزار داده می‌شود. برای حل جریان دو فازی و یافتن سطح آزاد بین دو فاز از روش حجم سیال (VOF)^{۱۵} 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

16. Surface-tracking technique

17. Work bench

14. Free surface

15. Volume of fluid

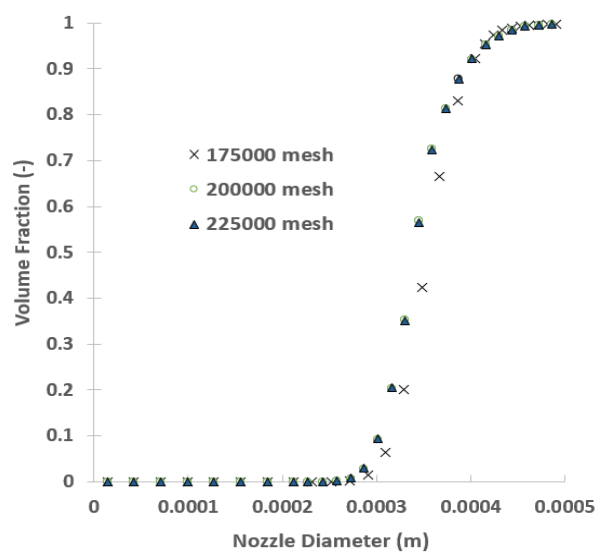


شکل ۵- مدل‌سازی سه‌بعدی و شبکه‌بندی انجام‌شده در محیط نرم‌افزار ورک‌بنچ

است. این روش دو طرح^{۲۲} دارد که از طرح ضمنی^{۲۳} آن استفاده شده است. فقط با استفاده از این طرح می‌توان جریان را به صورت پایا حل کرد [۲۴]. در پیاده‌سازی مدل VOF، امکان در نظر گرفتن کشتی سطحی نیز وجود دارد که در این تحقیق لحاظ گردیده است. برای حل از حل گر فشار مینا^{۲۴} استفاده شد و معادلات مومنتوم و پیوستگی به طور پی در پی حل شدند. برای وابسته کردن میدان سرعت و فشار، الگوریتم سیمپل سی^{۲۵} انتخاب شد. این الگوریتم در بین خانواده روش‌های سیمپل^{۲۶} عملکرد بهتری دارد. برای میانمایی فشار، روش پرستو^{۲۷} بکار گرفته شد، چون در جریان‌های با سرعت پیشگی بالا، استفاده از این روش به پایداری جریان و روند همگرایی آن کمک می‌کند. معادلات مومنتوم، کسر حجمی سیال و معادلات آشفستگی برای دقت بالاتر همگی با روش کوئیک گسسته‌سازی شدند.

نتایج تحلیل

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، 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 پیشگی به کمک نرم‌افزار فلوئنت انجام گرفت. بدنه اصلی انژکتور شامل محفظه چرخش، قسمت همگرا و نازل تخلیه است. دو ورودی مماسی در ابتدای محفظه چرخش طراحی شد تا سیال از طریق آنها وارد انژکتور شود و بعد از عبور از محفظه چرخش و قسمت همگرا، از نازل خارج شود. در مرحله تحلیل، تعداد زیادی اجرا گرفته شد و در این اجراها مشخصات هندسی انژکتور



شکل ۶- بررسی استقلال تحلیل از تعداد مش - نمودار کسر حجمی سوخت در خط شعاعی دهانه نازل تخلیه

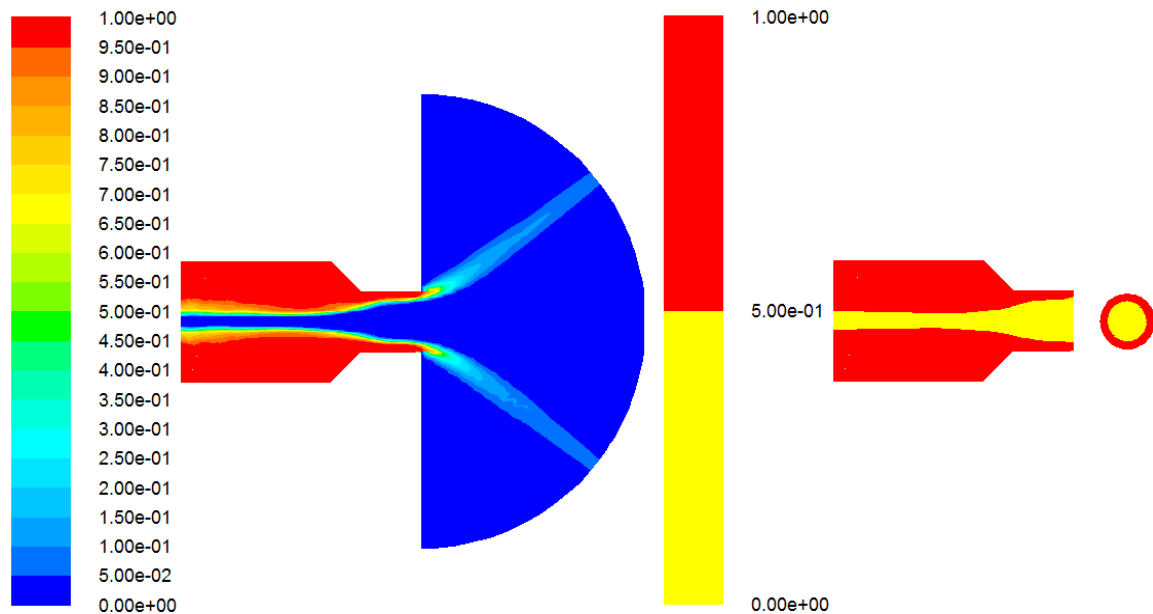
در این تحلیل، به عنوان مدل توربولانی از مدل $K-\epsilon$ RNG^{۱۸} استفاده شده است. این روش برای جریان‌های پیشگی توصیه شده است. برای ردیابی سطح^{۱۹} نیز از مدل حجم سیال VOF^{۲۰} استفاده شده است که با اعمال بر یک شبکه‌بندی ثابت اولرین، معادلات مومنتوم را حل می‌کند. متغیرها و مشخصات در هر سلول بسته به مقادیر کسر حجمی، یا مربوط به یک فاز بوده و یا به مخلوطی از فازها مربوطند. سطح مشترک بین یک مایع و یک گاز اصطلاحاً سطح آزاد^{۲۱} نامیده می‌شود. در پدیده پاشش یک سیال مایع و متمایز 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

22. Scheme
23. Implicit
24. Pressure-based
25. SimpleC
26. Simple
27. Presto

18. Renormalization Group
19. Surface Capturing
20. Volume of Fluid
21. Free Surface

سلول پر از سوخت و رنگ آبی (در شکل سمت چپ) و رنگ زرد (در شکل سمت راست) به منزله سلول خالی از سوخت است. به خوبی قابل مشاهده است که ستون گاز درون انژکتور تا انتها شکل گرفته است. 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 باشد.

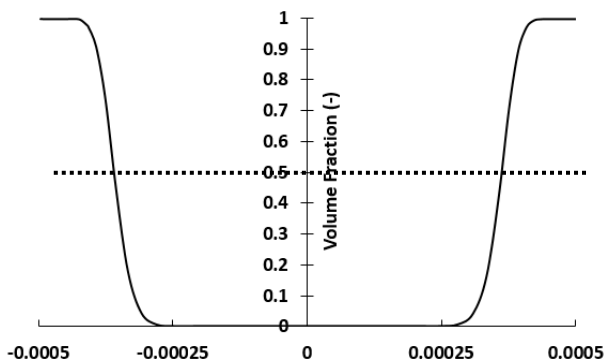
حول مقادیری که از طراحی بدست آمد، تغییرات با اندازه کوچک داده شد تا در نهایت به مشخصه‌های مورد نظر خصوصاً از نظر دبی جرمی و شکل گرفتن کامل حفره هوا درون انژکتور دست یافته شد. شکل ۷ کانتور کسر حجمی سوخت را نشان می‌دهد. کسر حجمی، یک پارامتر مهم در ارزیابی جریان‌ات دوفازی محسوب می‌شود زیرا نمایانگر این 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 به منزله



شکل ۷- کانتور کسر حجمی سوخت

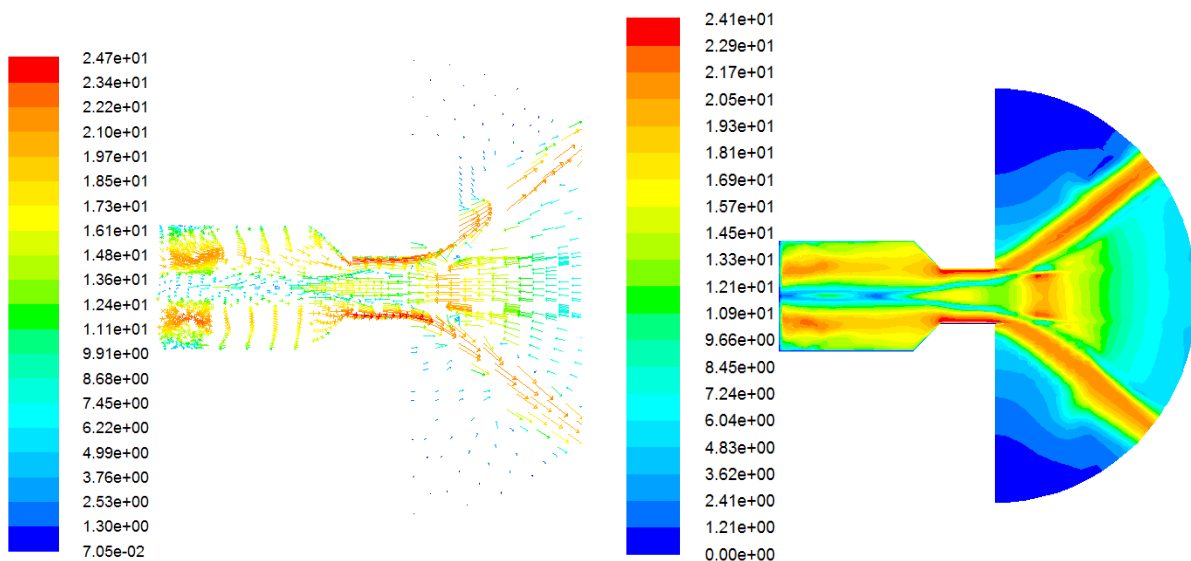
بلافاصله بعد از خروج از انژکتور به علت اتمام شرط مرزی دیواره و تبدیل سرعت مماسی سیال به سرعت شعاعی است. شکل ۹ کانتور دامنه و بردارهای سرعت را نشان می‌دهد. افت فشار در قسمت مرکزی انژکتور، جریانی را از بیرون به درون آن ایجاد می‌کند که جریان برگشتی نام دارد و این جریان برگشتی در کانتور بردارهای سرعت شکل ۹ قابل مشاهده است. سیال به علت دارا بودن سرعت مماسی در ورود به انژکتور تمایل دارد به سمت دیواره انژکتور حرکت کند. این امر سبب کاهش فشار در قسمت مرکزی درون محفظه می‌گردد. که به تبع آن، هوا به درون انژکتور مکش شده و حفره هوا تشکیل خواهد شد. همانطور که کانتور سرعت نشان می‌دهد، بیشترین میزان سرعت مربوط به لایه سیال چه در داخل نازل انژکتور و چه در خروج از دهانه است و کمترین مقادیر سرعت در قسمت فصل مشترک مایع و گاز چه در داخل انژکتور و چه بیرون آن دیده می‌شود که مربوط به اندرکنش سیال و گاز در جهت

با استفاده از این کانتور و همچنین نمودار شکل ۸ که نشان‌دهنده کسر حجمی سوخت در خط قطری دهانه نازل تخلیه است، ضخامت لایه سیال خروجی برابر $0/15$ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. بنابراین قطر حفره هوا در خروجی نازل $0/7$ میلی‌متر خواهد بود. زاویه مخروط پاشش نیز حدود 70 درجه بدست می‌آید که این پارامترها در جدول ۳ ارائه شده‌اند. زاویه اسپری، همان زاویه لایه 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 0.5 باشد. یعنی قرارداد می‌شود که مقادیر بالاتر از 0.5 تا 1 به سلول‌های پر از سوخت مایع تعلق دارد و مقادیر 0 تا 0.5 به سلول‌های پر از گاز تعلق دارد. اندازه ضخامت لایه سیال در خروجی و اندازه حفره هوا نیز به همین شیوه اندازه‌گیری شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، قطر حفره هوا در نزدیک خروجی انژکتور افزایش یافته است. علت این امر انحراف سیال

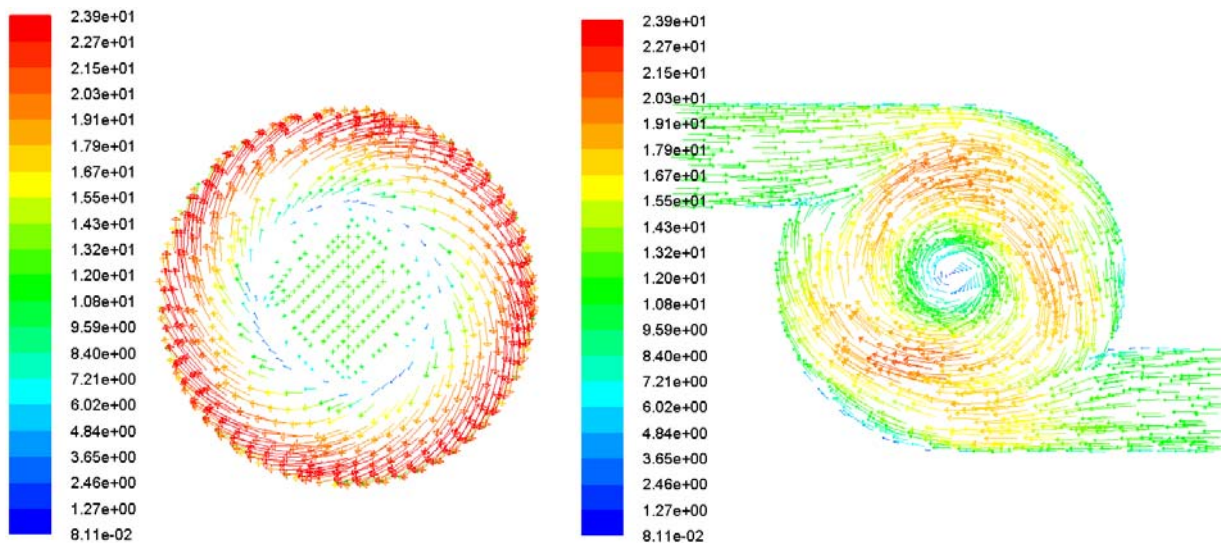


شکل ۸- نمودار کسر حجمی سوخت در خط قطری دهانه نازل تخلیه

مخالف همدیگر و ایجاد مناطقی با سرعت بسیار پایین و نزدیک به صفر است که نقاط سکون نام دارند. همچنین، توزیع سرعت محوری، شعاعی و محیطی در خط قطری دهانه خروجی انژکتور در شکل ۱۱ ارائه شده‌اند. نقطه قابل توجه در ارائه این نمودار این است که، سرعت محوری و محیطی تقریباً از یک مرتبه اندازه هستند. همچنین رفتار سرعت نیز و افت و خیزهای آن از این نمودار کاملاً قابل ارزیابی است. میانگین اندازه سرعت سیال در خروجی نازل معادل ۱۹/۸ متر بر ثانیه بدست آمد. دبی جرمی سوخت ورودی نیز از این تحلیل برابر ۰/۰۰۶۴ کیلوگرم بر ثانیه بدست آمد.



شکل ۹- کانتور اندازه دامنه و بردارهای سرعت



شکل ۱۰- بردارهای سرعت در مقطع عرضی دهانه خروج و راه‌های ورودی

جدول ۳- پارامترهای پاشش

پارامترهای پاشش	زاویه اولیه پاشش	۷۰ درجه
	ضخامت لایه سیال	۰.۱۵ میلی‌متر

جدول ۴- مقایسه کمی نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی

پارامتر	نتایج شبیه‌سازی	نتایج تجربی	خطا (%)
ضخامت لایه سیال (میلی‌متر)	۰/۵۵	۰/۵	۱۰
زاویه اسپری (درجه)	۸۰	۹۰	- ۱۱
سرعت متوسط مایع در دهانه خروجی (متر بر ثانیه)	۱۳	۱۳/۵	- ۴

۴ نتیجه‌گیری

در این مقاله، رویه طراحی و شبیه‌سازی یک انژکتور جریان پیچشی یک‌پایه (اما با عملکرد دوفازی) با دو ورودی مماسی ارائه شده است.

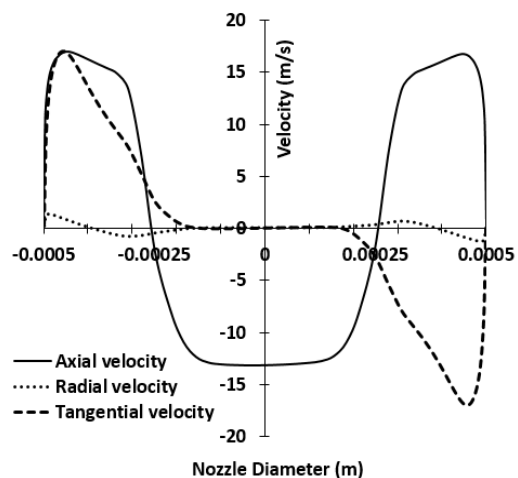
این انژکتور به منظور استفاده در یک رانشگر تک‌مولفه‌ای هیدرازینی با پیشران ۱۰ نیوتن طراحی شد. پارامترهای هندسی انژکتور در مرحله طراحی با در نظر گرفتن خصوصیات فیزیکی هیدرازین محاسبه شده‌اند. جریان داخلی این انژکتور ترکیبی از دو جریان مختلف جدای از هم با سطح تماس مشترک و در فازهای مایع و گاز است. روش VOF برای شبیه‌سازی چنین جریانی به کار گرفته شد و اثر آشفتگی جریان نیز با مدل k-ε مدل شد. با بررسی نتایج، این اطمینان حاصل شد که انژکتور طراحی شده، دبی جرمی مورد نظر (۰/۰۶۵ کیلوگرم بر ثانیه) را در اختلاف فشار معین طراحی (۵ بار نسبی) می‌تواند تامین کند و حفره هوا نیز به طور کامل تا انتها شکل می‌گیرد. همچنین زاویه پاشش مورد نظر (۷۰ درجه) نیز توسط آن تامین می‌شود. ضخامت فیلم سیال در طول نازل ثابت نبوده و به تدریج که به دهانه خروجی نازل نزدیکتر می‌شود، نازک‌تر می‌گردد. به همان نسبت، قطر حفره هوای تشکیل شده هم در طول نازل افزایش می‌یابد. همچنین ضخامت لایه خروجی سیال ۰/۱۵ میلی‌متر و قطر حفره هوا ۰/۷ میلی‌متر به دست آمده است. از اینرو ابعاد نهایی برای ساخت انژکتور و استفاده در رانشگر تک‌مولفه ۱۰ نیوتنی انتخاب شد. در واقع، این انژکتور به گونه‌ای 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

شکل ۱۰ بردارهای سرعت در مقطع عرضی دهانه خروج و راهه‌های ورودی را نشان می‌دهد. ماهیت پیچشی جریان و طریقه شکل گرفتن جریان پیچشی در ابتدای ورود جریان از طریق راهه‌ها به محفظه چرخش و همچنین مقدار سرعت در هر ناحیه کاملاً از این کانتورها مشهود است.

با بررسی نتایج، این اطمینان حاصل شد که انژکتور طراحی شده، دبی جرمی مورد نظر را در اختلاف فشار معین طراحی می‌تواند تامین کند و حفره هوا نیز به طور کامل تا انتها شکل می‌گیرد. همچنین زاویه پاشش مورد نظر نیز توسط آن تامین می‌شود. از اینرو این ابعاد به عنوان ابعاد نهایی برای ساخت و استفاده در رانشگر تک‌مولفه 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 سائز قطرات بر روی این انژکتور انجام گیرد.

اعتبارسنجی این روش عددی قبلاً برای نمونه دیگری از همین نوع انژکتور که مشخصات آن در مراجع [۲۰ و ۲۱] توسط همین نویسنده موجود است، انجام شده است. همانطور که در جدول ۴ 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 ۰/۰۸۲ کیلوگرم بر ثانیه در اختلاف فشار ۳/۵ بار نامی، در توافق خوبی هم از نظر کیفی و هم کمی با داده‌های تجربی می‌باشد. اختلاف در مقدار ضخامت لایه و زاویه پاشش بدست آمده از روش عددی حاضر با 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 است و عواملی نظیر زبری سطح داخلی نازل که بر این پارامترها تأثیر گذارند، می‌باشد.



شکل ۱۱- توزیع سرعت محوری، شعاعی و محیطی در دهانه خروجی انژکتور

- [12] Trinh. Huu, "Modeling of Turbulence Effect on Liquid Jet Atomization", Phuoc ProQuest Dissertations and Theses, 2004.
- [13] Trinh Huu P., Chen C. P., "Modeling of Turbulence Effects on Liquid Jet Atomization and Breakup", 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2005.
- [14] Bordas, R., John, V., Schmeyer, E., and Thevenin, D., "Measurement and Simulation of A Droplet Population in a Turbulent Flow Field." *Comput. Fluids*, 66, 2012, pp. 52-62.
- [15] Reddy, R., and Banerjee, R., "GPU Accelerated VOF Based Multiphase Flow Solver And Its Application To Sprays." *Comput. Fluids*, 117, 2015, pp. 287-303.
- [16] Grosshans, H., Szasz, R. Z., and Fuchs, L., "Enhanced Liquid-Gas Mixing Due To Pulsating Injection." *Comput. Fluids*, 107, 2015, pp. 196-204.
- [17] Movahednejad, E., Ommi, F. and Hosseinalipour, S. M., "Prediction of Droplet Size and Velocity Distribution in Droplet Formation Region of Liquid Spray", *Entropy*, 12, 2010, pp. 1484-1498 .
- [18] Hosseinalipour, S. M., Karimaei, H., 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, 29-30 May 2013 (in Persian).
- [19] 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, 13-15 May 2014 (in Persian).
- [20] Hosseinalipour, S. M. and Karimaei, H., "A New Model Based on Coupling of MEP/CFD/ILIA for Prediction of Primary Atomization", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 94, 2016, pp. 792-802.
- [21] Hosseinalipour, S. M. and 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", *International Journal of Spray and Combustion Dynamic*, 8, 2016, pp. 205-216.
- [22] F. Ommi., "Space Propulsion and Rocket", Besat Publication, 2009. (in persian)
- [23] Shankar, V. and Anantha Ram, K., "Experimental Investigations of The 10 N Catalytic Hydrazine Thruster", *Acta Astronautica*, 12, 1985, pp. 237-249.
- [24] Ansys-Fluent Software Version 15, "Fluent's User's Guide", 2015.

نگهداری دارای صرفه اقتصادی نیستند. از اینرو می‌تواند به‌عنوان ابزاری مفید در روند تحلیل، طراحی و بهینه‌سازی انژکتورها در کاربردهای صنعتی مختلف با هدف کاهش هزینه‌ها به‌کار رود.

مراجع

- [1] Yang, A.S., "Satellite Hydrazine Propulsion System Design Trades", *Journal of Da-Yeh University*, 10, 2001, PP. 41-50.
- [2] Bayvel, z., L. Orzechovski, *Liquid Atomization*, Taylor & Francis, 1993.
- [3] Chinn, J., "The Internal Flow And Exit Conditions of Pressure Swirl Atomizers," *Atomization Spray*, 10, 2000, pp. 121-146.
- [4] Cooper, D. and Yule, A. J. "Waves on The Air Core/Liquid Interface of A Pressure Swirl Atomizer." *Proc., 17th ILASS-Europe*, Switzerland, Zurich, 2001, pp. 105-115.
- [5] Buelow, Ph. E. O. and Mao, S., Smith, Ch. and Bretz, D., "Two-phase Computational Fluid Dynamics Analysis Applied to Prefilming Pure-Airbalast Atomizer," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, 2003, pp. 235-241.
- [6] R. El-Sayed Negeed, S. Hidaka, M. Kohnno, Y. Takata, "Experimental and Analytical Investigation of Liquid Sheet Breakup Characteristics", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 32, 2011, pp. 95-106.
- [7] K.Y. Huh, E. Lee, J.Y. Koo, "Diesel Spray Atomization Model Considering Nozzle Exit Turbulence Conditions", *Atomization and Sprays*, Vol. 8, 1998, pp. 453-469.
- [8] Sarre C.K., Kong S.C., Reitz R.D., "Modeling the Effects of Injector Nozzle Geometry on Diesel Sprays", SAE Congress, 1999.
- [9] K. Y. Huh, A.D. Gosman, "A Phenomenological Model of Diesel Spray Atomization," Pr International Conference on Multiphase Flows, Tsukuba, Japan, 1991.
- [10] Klein M., Sadiki A., "A Digital Filter Based Generation of Inflow Data for Spatially Developing Direct Numerical or Large Eddy Simulations", *J. Computational Physics*, Vol. 186, 2003, pp. 652-665.
- [11] Trinh H.P., Chen C.P., Balasubramanyan M.S., "Numerical Simulation of Liquid Jet Atomization Including Turbulence Effects", *J. Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 129, 2007, pp. 920-928.