

طراحی انژکتور گریز از مرکز دو پایه برای افزایش ایمپالس ویژه در موتور موشک سوخت مایع

فتح‌اله امّی^۱، احسان موحدنژاد^۲ و امیر کارگر^۳

آزمایشگاه موتور و پیشرانش، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

پاشش بهینه انژکتورها و توزیع یکنواخت سوخت در محفظه احتراق موتور موشک سوخت مایع از پارامترهای اساسی در میزان نیروی پیشران و پایداری احتراق می باشد. از طرفی، مزایای مختلف انژکتورهای دو پایه گریز از مرکز در مقایسه با انواع یکپایه و جریان مستقیم، سبب افزایش کاربرد این نوع انژکتورها در صنایع موشکی شده است. از مزایای اصلی این انژکتورها قابلیت ایجاد چتر پاشش یکنواخت با زاویه پاشش دلخواه و اتمیزاسیون بهتر قطرات سیال احیاکننده و اکسیدکننده در محفظه می باشد. در این مقاله اصول پایه ای محاسبات انژکتورهای گریز از مرکز بررسی و به کمک نتایج آزمایشگاهی روش طراحی آن تبیین شده است. برای طراحی انژکتور دو پایه مایع-مایع با بررسی شرایط خاص این نوع انژکتورها و تأثیر آن در محاسبات، یک کد کامپیوتری تهیه شده است. در نهایت با ساخت چند نمونه انژکتور دو پایه گریز از مرکز مایع-مایع مبتنی بر نتایج کد فوق‌الذکر، در مجموعه تست سرد آزمایش شده است. نتایج تجربی تست سرد حاکی از آن است که مشخصه های پاشش، مانند زاویه پاشش، توزیع و میزان دبی و یکنواختی اسپری مطابق انتظار است.

واژه‌های کلیدی: موتور موشک سوخت مایع، انژکتور دو پایه گریز از مرکز، پیشرانش، مخروط پاشش، زاویه پاشش

Dual Base Swirl Injector Design for Increasing Specific Impulse in a Liquid-Fuel Rocket Engine

Movahednejad, A. Kargar Ommi, E. F.

Engine and Propulsion Lab., School of Eng., Tarbiat Modarres Univ

ABSTRACT

In this article, the fundamental calculations of swirl injectors were investigated and the design method for these kinds of injector, i.e. dual-base liquid-liquid injectors, was presented based on this theory and some experimental results. Then, some special conditions related to dual based liquid-liquid injectors were studied and the corresponding results were considered in the design manipulation. The behavior of injector in various performing conditions and mutual effects on twin spray envelopes in dual base injector were investigated, and the design procedure was presented based on the obtained results. Finally, the computer code for designing this type of injector was proposed. Using this code, some injectors were designed and tested. The results were satisfactory.

Key Words: Liquid Propellant Rocket, Swirl Dual Base Injector, Propulsion, Spray Cone, Spray Angle

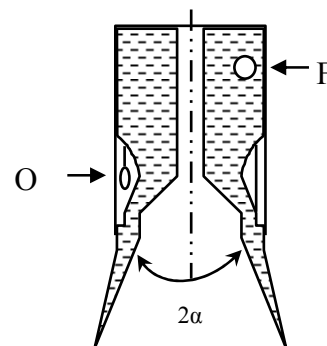
۱- استادیار: f_ommi@yahoo.com

۲- دانشجوی دکتری تبدیل انرژی: emovahed@yahoo.com

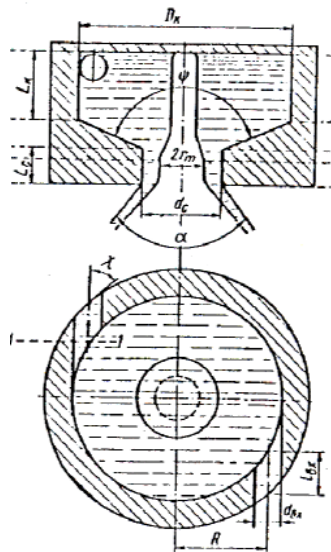
۳- کارشناس ارشد مهندسی هوافضا(نویسنده پاسخگو): amirkargar@yahoo.com

۱- مقدمه

مزایای مختلف انژکتورهای دو پایه گریز از مرکز در مقایسه با انواع یکپایه و جریان مستقیم، سبب افزایش کاربرد این نوع انژکتور در صنایع موشکی شده است. مزایای اصلی این انژکتورها شامل قابلیت ایجاد چتر پاشش با زاویه پاشش دلخواه، متمیزاسیون بهتر قطرات سیال و اختلاط مناسب و یکنواخت احیاکننده و اکسیدکننده می باشد که این خصوصیات باعث بهبود کیفیت احتراق و کاهش ناپایداری احتراق می شود. عبور هر دو سیال عامل احیاکننده و اکسیدکننده در انژکتورهای دو پایه باعث می شود که بتوان بدون افزایش قطر صفحه انژکتور دبی سیال سوخت را افزایش داد. در صورت ثابت بودن دبی، می توان قطر محفظه احتراق را کاهش داد که این امر موجب بالارفتن فشار گازهای حاصل از احتراق و به تبع آن نیروی پیشرانش خواهد شد. روش طراحی بر این اساس بنا شده است که ابتدا معادلات براساس قوانین مکانیک سیالات برای سیال ایده آل حل شده و سپس با استفاده از یک سری ضرایب و منحنیهای تجربی اصلاح می گردد. قوانین مورد استفاده در تئوری انژکتور گریز از مرکز عبارتند از: اصل بقاء جرم، اصل بقاء اندازه حرکت زاویه ای، اصل بقاء انرژی یا معادله برنولی و اصل حداکثر دبی یا حداقل انرژی. شکل ۱ شمای یک انژکتور دو پایه مخلوط در خارج و شکل ۲ برشی از انژکتور گریز از مرکز را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۲ مشخص است D_k قطر روزنه ورودی، L_{Bx} طول روزنه ورودی، D_k بازوی چرخش یا شعاع چرخش است.



شکل ۱: شمای یک انژکتور دو پایه مخلوط در خارج [۱].



شکل ۲: برش انژکتور گریز از مرکز [۱]

یکی از پارامترهای مهم در طراحی انژکتور گریز از مرکز، پارامتری است به نام مشخصه هندسی که بدین صورت تعریف می شود:

$$A = \frac{Rr_c}{nr_{Bx}^2} \quad (1)$$

طبق اصل بقاء اندازه حرکت زاویه ای بصورت زیر ثابت است:

$$M = V_u r = V_{int} R = Const. \quad (2)$$

در این رابطه V_u سرعت چرخشی سیال درون انژکتور، V_{int} سرعت ورود سیال به داخل محفظه چرخش و r فاصله از محور انژکتور است. طبق این رابطه هر چه فاصله به محور انژکتور نزدیکتر باشد، سرعت چرخشی سیال بیشتر خواهد بود. بلکه در شعاع معینی بواسطه زیاد شدن نیروی گریز از مرکز، سیال نمی تواند به محور انژکتور نزدیک تر شود. بنابراین یک استوانه خالی از سیال در مرکز انژکتور به وجود می آید که داخل آن را هوا پر می کند. شعاع این ورتکس هوا را با r_m نشان می دهند. این همان پدیده ای است که در گردابه ها بوجود می آید. بنابراین جریان مایع در نازل از میان مقطع دایره ای شکلی می گذرد که شعاع داخلی آن r_m و شعاع خارجی آن r_c است. مساحت جریان حلقوی برابر است با:

$$Fk = \pi(r_c^2 - r_m^2) = \phi\pi r_c^2 \quad (3)$$

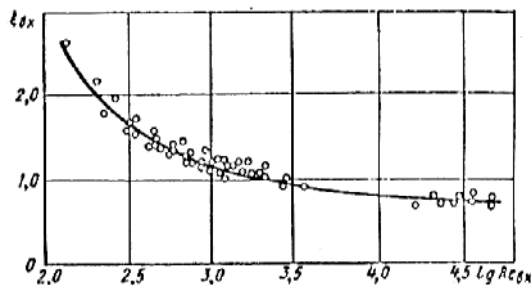
پایه گریز از مرکز گاز- مایع تحقیقاتی را انجام داد [۸].
کر^{۱۰} و لیدوکس^{۱۱} (۱۹۷۰) اثر چرخش سیال درون انژکتور
را بررسی و روابطی برای طول مخروط اسپری L، ماکزیمم
نرخ رشد Ω و طول موج غالب Λ ارائه کرد [۹]. مک
کارتی^{۱۲} و مولوی^{۱۳} (۱۹۷۴)، و در ادامه ریتز^{۱۴} و براکو^{۱۵}
(۱۹۸۶) مکانیزم اتمیزاسیون را به همراه رابطه ای را برای
محاسبه زاویه اسپری بیان کردند [۱۰]. اشگریز و مشایخ
(۱۹۹۳) تحقیقاتی پیرامون متد حجم سیال^{۱۶} انجام
دادند [۱۱].

۳- تأثیر اصطکاک بر جریان

هنگامی که سیال از روزنه ورودی عبور کرده و به محفظه
چرخش می‌رسد، در سیال افت فشار ایجاد می‌شود که
مقدار آن برابر است با:

$$\Delta P_{Bx} = \zeta_{Bx} \frac{\rho V_{Bx}^2}{2} \quad (۶)$$

پارامتر ζ_{Bx} ضریب افت روزنه ورودی نام دارد و مقدار آن
از آزمایشات تجربی دست می‌آید. در شکل ۳، نمودار
ضریب افت روزنه ورودی بر حسب عدد رینولدز بصورت زیر
آورده شده است:



شکل ۳: نمودار مقدار مقاومت کانالهای ورودی ζ_{Bx} و
عدد رینولدز Re_B [۱].

$$Re_{Bx} = \frac{V_{Bx} d_{Bx} \sqrt{n}}{\nu} \quad (۷)$$

که در آن φ_c ، ضریب انقباض نازل نامیده می‌شود و برابر
است با:

$$\varphi_c = 1 - \frac{r_m^2}{r_c^2} \quad (۴)$$

باید φ_c یک مقدار بهینه داشته باشد که در آن دبی به
حداکثر می‌رسد. این در واقع توضیح فیزیکی اصل حداکثر
دبی است. دبی انژکتور برابر است با:

$$G = \pi r_c^2 \mu \sqrt{2\rho \Delta P_\phi} \quad (۵)$$

که در آن μ ضریب دبی نام دارد و تابعی از A و φ_c
است. طبق توضیحات بالا و اصل حداکثر دبی باید شرط
 $\frac{d\mu}{d\varphi_c} = 0$ برقرار باشد. بدین ترتیب رابطه بین A و φ_c
بدست می‌آید.

۲- تاریخچه

با وجود اینکه تا کنون تحقیقات زیادی پیرامون
مشخصه های اسپری ناشی از پاشش انژکتورها انجام شده
است، ولی هنوز اطلاعات دقیقی پیرامون خصوصیات پاشش
مانند ارتباط اندازه قطرات پایین دست خروجی نازل با
شرایط خروجی انژکتور بدست نیامده است.

زاهو^۱ و همکارانش (۱۹۸۶) نحوه توزیع پاشش و سایز
قطرات در انژکتور گریز از مرکز [۲] و واسیلیوف و
کودریاتسوف (۱۹۹۳) توزیع پاشش انژکتورها را در صفحه
انژکتور مورد بررسی قرار دادند [۳].

پای^۲ و نیجاوانا^۳ (۱۹۸۲) تجزیه و طول پاشش
اسپری [۴]، دورفتر^۴ و دومنیک^۵ (۱۹۹۶) اثرات ویسکوزیته
و کشش سطحی را بر توزیع پاشش اسپری در انژکتور گریز
از مرکز مورد بررسی قرار دادند [۵]. رانگانادا^۶ و نلسون^۷
تأثیرات فشار و نازل خروجی را بر توزیع پاشش [۶] و
گیفن^۸ وابستگی سایز قطرات بر زبری سطح انجام شده
است [۷]. تیت^۹ (۱۹۶۰) پیرامون نحوه نفوذ انژکتورهای دو

^۱-Zahao

^۲-Paie

^۳-Nijaquana

^۴-Dorfner

^۵-Domnic

^۶-Ranganadha

^۷-Nelson

^۸-Giffen

^۹-Tate

^{۱۰}-Care

^{۱۱}-Ledoux

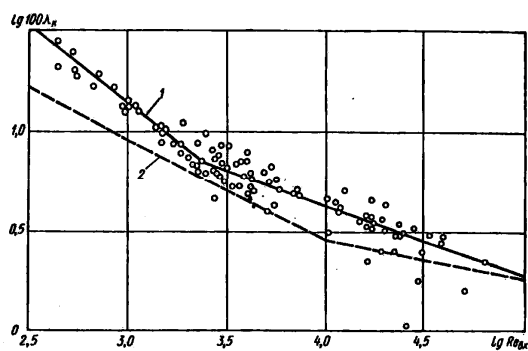
^{۱۲}-McCarthy

^{۱۳}-Molloy

^{۱۴}-Reitz

^{۱۵}-Bracco

^{۱۶}-Fluid Volume Method



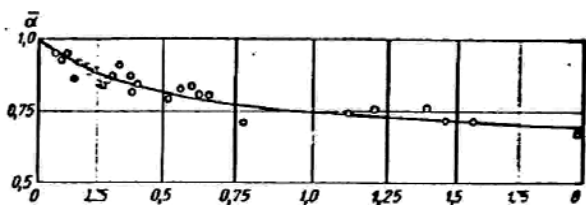
شکل ۵: رابطه مقدار اصطکاک با عدد رینولدز ورودی [۱۲]. ۱- رابطه تجربی ۲- رابطه تئوری

هنگامی که سیال از مخروط ورودی نازل به داخل نازل وارد می‌شود، به علت تغییر ناگهانی شیب مسیر، پخش هیدرولیکی ایجاد می‌شود، که در نهایت باعث افت انرژی می‌شود. ضریب افت انرژی تعریف شده در این قسمت با ϵ_c نشان داده می‌شود و براساس داده‌های تجربی مشخص می‌شود. جمع افت انرژی در کانالهای ورودی (ΔBx) و محفظه چرخش (ΔK) و نازل (ΔC) در طراحی انژکتور نقش بسزائی دارد.

هنگامی که سیال از نازل خارج می‌شود به صورت مخروطی با زاویه α پاشیده می‌شود. زاویه چتر پاشش که براساس محاسبات به دست می‌آید با مقدار بدست آمده از آزمایش مقاداری تفاوت دارد. از این رو برای زاویه پاشش ضریب تصحیح تعریف می‌کنند و این ضریب برابر است با:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_{EXP}}{\alpha_T} \quad (11)$$

در این عبارت α_{EXP} زاویه بدست آمده بوسیله آزمایش است و α_T زاویه پاشش براساس محاسبات طراحی است. در شکل ۶ نمودار $\bar{\alpha}$ برحسب مجموعه θ آورده شده است.



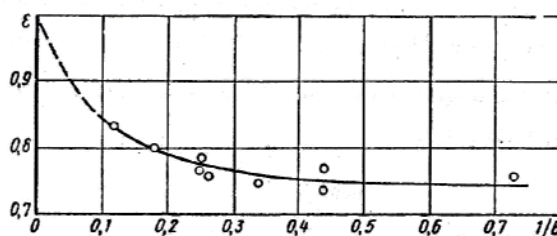
شکل ۶: رابطه زاویه نسبی مخروط پاشش α با مجموعه θ

هنگامی که سیال از روزنه ورودی وارد محفظه چرخش می‌شود، به گونه‌ای منقبض می‌شود که شعاع متوسط چرخش افزایش می‌یابد و از R به R_ϵ می‌رسد. در اینجا ضریبی به نام ϵ تعریف می‌شود که برابر است با:

$$\epsilon = \frac{R}{R_\epsilon} \quad (8)$$

آورده شده است. مقدار $\frac{1}{B}$ برحسب تغییرات ϵ از آزمایشات تجربی بدست می‌آید. در شکل ۴ منحنی ϵ مقدار بدین ترتیب مشخصه هندسی انژکتور به صورت زیر در می‌آید:

$$A_D = \frac{Rr_c}{\epsilon nr_{Bx}^2} \quad (9)$$



شکل ۴: رابطه میزان تغییر شکل جریان ورودی ϵ با $1/B$ [۱]

در داخل محفظه چرخش به علت وجود اصطکاک بین سیال و دیواره، اتلاف انرژی وجود دارد. برای محاسبه میزان اصطکاک، ضریب اصطکاک λ_k از منحنی شکل ۵ بدست می‌آید. در اینجا پارامتری به نام θ تعریف می‌شود که نشان دهنده میزان تأثیر اصطکاک است. این پارامتر برابر است با

$$\theta = \frac{\lambda_k}{2} A_D \left(\frac{R_k}{r_c} - 1 \right) \quad (10)$$

در این فرمول R_k شعاع محفظه چرخش است.

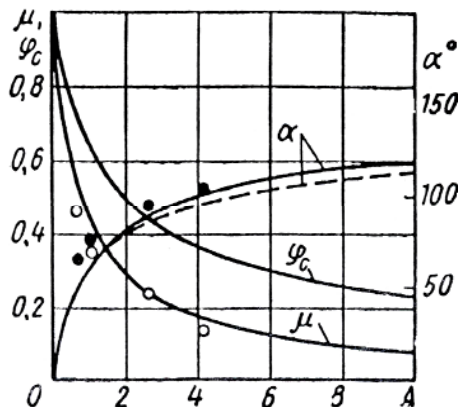
۴- مراحل طراحی انژکتور گریز از مرکز

انژکتور گریز از مرکز باید تحت زاویهٔ مخروط پاشش معین و اختلاف فشار معلوم دبی مایع لازم را تأمین کند. همچنین مطلوب است که افت انرژی حداقل باشد. زیرا با افزایش افت انرژی، سرعت جریان خروجی از انژکتور کاهش یافته و کیفیت پاشش افت می‌کند. تأثیر اصطکاک بوسیلهٔ مجموع θ تعیین می‌گردد. هرچه مجموعه θ کوچکتر باشد تأثیر ویسکوزیتهٔ مایع بر هیدرولیک انژکتور گریز از مرکز ضعیف‌تر خواهد بود. برای مایعی که ویسکوزیتهٔ آن کم است (مثل بنزین، نفت و آب) مناسب است ضریب فراحی انژکتور $(C_c = \frac{R}{r_c})$ در حدود $1.25 \leq C_c \leq 5$ انتخاب شود. در این حالت هرچه زاویهٔ مخروط پاشش بزرگتر باشد باید اندازهٔ C_c را کوچکتر انتخاب کرد. زیاد شدن طول نازل مطلوب نیست زیرا باعث کاهش زاویهٔ مخروط پاشش می‌گردد. توصیه می‌شود طول نسبی قسمت استوانه‌ای نازل $(\bar{L}_c = \frac{L_c}{d_c})$ در محدودهٔ $0.25 \leq \bar{L}_c \leq 1.0$ انتخاب شود. همچنین توصیه می‌شود زاویهٔ مخروط ورودی به نازل را در محدودهٔ $60^\circ \leq \psi \leq 120^\circ$ انتخاب کنید. اگر کانالهای ورودی دارای طول کافی نباشد جریان نمی‌تواند جهت مماسی بگیرد و به سمت محور محفظهٔ چرخش متمایل می‌گردد. در نتیجه زاویهٔ مخروط پاشش کوچکتر و ضریب تخلیه بزرگتر می‌شود. از این رو طول کانالهای ورودی نباید کوچکتر از ۱٫۵ برابر قطر داخلی آن باشد. از طرفی این طول نباید زیاد هم بزرگ باشد زیرا در این حالت، افت انرژی حاصل از اصطکاک زیاد می‌شود. در انژکتورهای باز (مقادیر کم C_c) افت انرژی در کانالهای ورودی خود را نشان می‌دهد. از این رو لازم است که اندازهٔ C_c بزرگتر از ۱/۲۵ ($C_c \geq 1.25$) انتخاب شود. طراحی هیدرولیکی انژکتور گریز از مرکز ساده، شامل تعیین ابعاد نازل، محفظهٔ چرخش و کانالهای ورودی است. اطلاعات اولیه عبارتند از: زاویهٔ مخروط پاشش، دبی، اختلاف فشار انژکتور، زاویهٔ ورودی به نازل، تعداد سوراخهای ورودی به محفظهٔ چرخش و چگالی و ویسکوزیتهٔ سیال. حال مراحل طراحی به اختصار ذکر می‌شود:

- ۱- با توجه به توصیه‌های اشاره شده، مقادیر C_c, n, ψ ، $\alpha, \Delta, \Delta P, \phi, G, \rho, V$ انتخاب می‌شود،
- ۲- در دامنهٔ تغییرات θ ، عملاً اندازه $\bar{\alpha}$ در محدودهٔ $0.5 \leq \bar{\alpha} \leq 1.0$ تغییر می‌کند. (به شکل ۶ رجوع شود). در محاسبهٔ اولین تقریب. مقدار $\bar{\alpha}$ را برابر $\bar{\alpha}_0 = 0.85$ در نظر گرفت. آنگاه با توجه به مقدار داده شدهٔ زاویهٔ مخروط پاشش برابر است با:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_0}{0.85}, \quad (12)$$

- ۳- با توجه به مقدار α_1 و به کمک منحنی $\alpha=f(A)$ در شکل ۷ مقدار مشخصهٔ A_{DI} بدست می‌آید،
- ۴- از روی منحنی $\mu=f(A)$ در شکل ۷، ضریب تخلیهٔ μ_1 مربوط به A_{DI} بدست می‌آید،



شکل ۷: رابطه ضریب تخلیه، ضریب انقباض نازل و زاویه مخروط پاشش نسبت به مشخصه هندسی انژکتور [۱]

- ۵- با توجه به مقدار داده شده دبی G ، اختلاف فشار $\Delta P, \phi$ ، چگالی ρ و مقدار بدست آمده μ_1 ، قطر نازل انژکتور را محاسبه می‌شود:

$$d_{cl} = \sqrt{\frac{4G}{\pi \mu_1 \sqrt{2\rho \Delta \times \phi}}}, \quad (13)$$

- ۶- با توجه به مقدار انتخاب شدهٔ C_c و مقدار بدست آمدهٔ d_{cl} اندازهٔ بازوی چرخش را بدست می‌آید:

$$R_1 = C_c d_{cl}, \quad (14)$$

- ۷- از روی مقادیر A_{DI}, d_{cl}, R_1, n ، قطر کانالهای ورودی محاسبه می‌شود.

$$\Delta K = \frac{\lambda_K}{\sigma^2} \left\{ \frac{1}{\sigma} \left(1 - \frac{1}{C_k} \right) + \lambda_k \left[\left(\frac{A_D}{2} - \frac{1}{2\sigma - \lambda_k} \right) \left(\frac{2}{\sigma} + \frac{A_D}{2} + \frac{1}{2\sigma - \lambda_k} \right) + \frac{3}{2\sigma^2} \ln \frac{(2\sigma - \lambda_k) A_D C_k}{2} \right] \right\}$$

$$\sigma = \frac{1}{A_D} + \frac{\lambda_k}{2} C_k ; \quad C_k = \frac{R_k}{r_c}$$

۱۷- با آزمایشات تجربی مشخص شده است که مقدار ضریب مقاومت نازل (ζ_c) در زوایای ورودی $\psi = 90^\circ$ و $\psi = 120^\circ$ برابر است با $\zeta_c = 0,11$. ضریب مقاومت نازل در زوایای دیگر را می‌توان با استفاده از روش درون‌یابی و یا برون‌یابی بین دو مقدار گفته شده در بالا بدست آورد. با استفاده از روش بالا و با توجه به مقدار ψ انتخاب شده، ضریب مقاومت نازل (ζ_c) بدست می‌آید.

۱۸- با توجه به $A = A_{cl}$ و با استفاده از منحنی $\varphi = f(A)$ در شکل (۷) مقدار ضریب انقباض φ_c بدست می‌آید.

۱۹- با توجه به مقادیر بدست آمده ζ_c و φ_c ، مقدار ΔC_1 از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta C = \frac{\zeta_c}{\varphi_c^2}, \quad (22)$$

۲۰- ضریب تخلیه در تقریب اول با استفاده از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$\mu_{pl} = \frac{\mu_{\theta 1}}{\sqrt{1 + \Delta \Sigma_1 \mu_{\theta 1}^2}} \quad (23)$$

۲۱- از روی اندازه $B_1 = \frac{R_1}{r_{Bxl}}$ و با استفاده از منحنی $\varepsilon = f\left(\frac{1}{B}\right)$ در شکل ۴، ضریب تغییر شکل جریان ورودی

ε_1 تعیین می‌شود،

۲۲- مقادیر بدست آمده ε_1 و μ_{pl} و α_{pl} با مقادیر ε_0 و μ_0 و α_0 مقایسه کرده (بیشتر به تطابق μ_{pl} و μ_0 توجه می‌شود). چنانچه تفاوت از مقدار مجاز تجاوز کند، دومین تقریب انجام می‌شود. در این صورت با توجه به مقدار داده شده زاویه مخروط پاشش α_0 و مقدار $\bar{\alpha}_1 = \frac{\alpha_0}{\alpha_1}$ بدست آمده از تقریب اول مقدار

تعیین می‌شود،

$$d_{Bxl} = 2 \sqrt{\frac{R_1 r_{cl}}{\varepsilon_0 n A_{DI}}}, \quad (15)$$

در اینجا برای تقریب اول فرض می‌شود $\varepsilon_0 = 0.8$ ،

۸- عدد رینولدز جریان بدین صورت محاسبه می‌شود:

$$Re_{Bxl} = \frac{4G}{\rho v \pi d_{Bxl} \sqrt{n}} \quad (16)$$

۹- از روی منحنی $\lambda_k = f(Re_{Bx})$ (شکل ۵)، ضریب اصطکاک λ_{kl} بدست می‌آید،

۱۰- اندازه مشخصه معادل انژکتور بدین صورت بدست می‌آید:

$$A_{cl} = \frac{A_{DI}}{1 + \theta_1} \quad (17)$$

$$\theta_1 = (0.5 \sigma \lambda_{kl} A_{DI} (C_{kl} - 1)) ,$$

در این رابطه:

$$C_{kl} = C_c + \frac{r_{Bxl}}{r_{cl}}$$

۱۱- با توجه به منحنیهای $\mu, \alpha = f(A)$ در شکل (۷) اندازه‌های $\mu_{\theta 1}$ و $\alpha_{\theta 1}$ مربوط به A_c تعیین می‌شود.

۱۲- اندازه $\bar{\alpha}_1$ مربوط به θ_1 از روی منحنی $\bar{\alpha} = f(\theta)$ شکل ۶ بدست می‌آید،

۱۳- اندازه زاویه محاسباتی مخروط پاشش در تقریب اول بدست می‌آید:

$$\alpha_{pl} = \bar{\alpha}_1 \alpha_{\theta 0}, \quad (18)$$

۱۴- جمع افت انرژی در انژکتور عبارتست از:

$$\Delta \Sigma \Delta Bx_1 + \Delta K_1 + \Delta C_1, \quad (19)$$

که تک تک آنها محاسبه می‌شود. با استفاده از منحنی $\zeta_{Bx} = f(Re'_{Bx})$ در شکل ۳، مقدار ζ_{Bx} بدست می‌آید. در اینجا:

$$Re'_{Bx} = \frac{4G}{\rho \pi d_{Bx} n v},$$

۱۵- با استفاده از فرمول زیر مقدار ΔBx_1 بدست می‌آید:

$$\Delta Bx = \zeta_{Bx} \frac{A^2}{C_c^2} \quad C_c = \frac{R}{r_c}, \quad (20)$$

۱۶- با استفاده از فرمول زیر مقدار ΔK_1 محاسبه می‌شود.

۳۴- ضریب افت انرژی در انژکتور ($\Delta\Sigma_2$) مانند مرحله اول بدست می‌آید،

۳۵- ضریب تخلیه در تقریب دوم نیز از رابطه (۳۰) بدست می‌آید.

$$\mu_{p2} = \frac{\mu_{02}}{\sqrt{1 + \Delta\Sigma_1 \mu_{21}^2}}, \quad (30)$$

۳۶- از روی مقدار $B_2 = \frac{R_2}{r_{Bx2}}$ و با استفاده از منحنی

$$\varepsilon = f\left(\frac{1}{B}\right) \quad (4), \text{ مقدار } \varepsilon_2 \text{ بدست می‌آید،}$$

۳۷- مقادیر بدست آمده α_{p2} , μ_{p2} , ε_2 را با مقادیر α_0 , μ'_2 و ε_1 مقایسه کرده، چنانچه تفاوت از حد مجاز فراتر رود، تقریب سوم شبیه به محاسبه تقریب دوم انجام می‌شود و الی آخر. چنانچه تقریب‌های پی‌درپی به نتیجه مطلوب نرسد، لازم است مقدار فراخی انژکتور (C_c) کوچکتر انتخاب شود،

۳۸- پس آنکه اندازه‌های قطر نازل (d_c)، بازوی چرخش (R) و قطر کانالهای ورودی (d_{Bx}) بدست آمد، ابعاد انژکتور محاسبه می‌شود. به کمک رابطه $D_k = 2(R + r_{Bx})$ قطر محفظه چرخش محاسبه می‌شود. طول نازل (L_c)، طول کانالهای ورودی (L_{Bx}) و طول محفظه چرخش (L_k) نیز با توجه به توصیه‌هایی که در ابتدای این قسمت آمد، انتخاب می‌شود و

۳۹- روش بررسی شده بالا دارای کاربرد گسترده‌ای است و دارای دقتی تا $\pm 1\%$ می‌باشد.

۵- محاسبات انژکتور گریز از مرکز دو پایه

همانطور که شکل ۱ و ۲ نشان داده شد، در انژکتور گریز از مرکز فرایند اختلاط بین احیا کننده و اکسید کننده در خارج از انژکتور انجام می‌شود. به همین علت پارامترهای طراحی انژکتور باید به نحوی انتخاب شود که مخروطهای پاشش احیاکننده و اکسیدکننده در نزدیکی خروجی نازلها، یکدیگر را قطع کنند. در این حالت زاویه پاشش احیاکننده با α_F و زاویه پاشش اکسیدکننده با α_0 نشان داده می‌شود. محاسبه انژکتورهای دو مؤلفه‌ای با اختلاط خارجی، دقیقاً مثل محاسبات انژکتور گریز از مرکز یک پایه می‌باشد. زیرا این انژکتورها، دقیقاً براساس تئوری

۲۳- با توجه به مقدار α_2 و با استفاده از منحنی μ, α $f(A)$ در شکل (۷)، مقادیر A_{D2} و μ_2 مربوط به A_{D2} بدست می‌آید،

۲۴- با احتساب ضریب افت انرژی مشخص شده در بالا ($\Delta\Sigma_1$)، مقدار μ'_2 محاسبه می‌شود:

$$\mu'_2 = \frac{\mu_2}{\sqrt{1 + \Delta\Sigma_1 \mu_2^2}}, \quad (24)$$

۲۵- قطر نازل انژکتور از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$d_{c2} = \sqrt{\frac{4G}{\pi \mu'_2 \sqrt{2\rho \Delta p_\phi}}}, \quad (25)$$

۲۶- اندازه بازوی چرخش تعیین می‌شود:

$$R_2 = C_c r_c, \quad (26)$$

۲۷- قطر کانالهای ورودی محاسبه می‌شود:

$$d_{Bx2} = 2 \sqrt{\frac{R_2 r_{c2}}{\varepsilon_1 n A_{D2}} - \frac{\lambda_{kl}}{2} \frac{R_2 r_{c2}}{\varepsilon_1 n} (C_{kl} - 1)}, \quad (27)$$

در رابطه بالا n از پیش تعیین شده است، اما λ_{kl} , C_{kl} ε_1 در اولین تقریب بدست می‌آیند،

۲۸- عدد رینولدز محاسبه می‌شود:

$$Re_{Bx2} = \frac{4G}{\rho v \pi d_{Bx2} \sqrt{n}}, \quad (28)$$

۲۹- ضریب اصطکاک به کمک منحنی $\lambda_k = f(Re_{Bx})$ در شکل (۵) تعیین می‌شود.

۳۰- در ادامه، مشخصه معادل انژکتور بدست می‌آید.

$$A_{e2} = \frac{R_2 r_{c2}}{\varepsilon_1 n r_{Bx2}^2 (1 + \theta_2)}, \quad (29)$$

که در این رابطه:

$$C_{k2} = C_c + \frac{r_{Bx2}}{r_{c2}} \quad \text{و} \quad \theta_2 = \frac{\lambda_{k2}}{2} \frac{R_2 r_{c2}}{\varepsilon_1 n r_{Bx2}^2} (C_{k2} - 1),$$

۳۱- با توجه به منحنی $\mu, \alpha = f(A)$ شکل (۷)، اندازه‌های α_{02} و μ_{02} مربوط به مقدار A_{e2} تعیین می‌شود،

۳۲- با استفاده از نمودار $\bar{\alpha} = f(\theta)$ شکل (۶) مقدار $\bar{\alpha}_2$ بدست می‌آید،

۳۳- به کمک فرمول $\bar{\alpha}_{p2} = \bar{\alpha}_2 \alpha_{02}$ ، بزرگی زاویه محاسبه شده مخروط پاشش در تقریب دوم بدست می‌آید،

$$R_F = R_0 \gamma_R = R \gamma_R \quad \text{و} \quad \bar{R} = R \frac{(K_m + \gamma_R \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_F}})}{K_m + 1}$$

$$V_{Bx} = V_{Bx0} \frac{(K_m + \gamma_R \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_F}})}{K_m + 1}$$

با توجه به روابط بالا می‌توان مشخصه هندسی انژکتور گریز از مرکز دو پایه بالا را به صورت زیر نوشت.

$$\bar{A} = \frac{K_m (K_m + \gamma_R \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_F}})}{(K_m + 1) (K_m + \frac{\rho_0}{\rho_F})} n_0 r_{Bx0}^2, \quad (35)$$

لازم به ذکر است که روابط مربوط به μ_ϕ و ϕ و α ، همان روابط مربوط به انژکتور گریز از مرکز یک پایه است. با این تفاوت که برای انژکتورهای دو پایه، باید در روابط، به جای

A از \bar{A} استفاده شود. در این صورت می‌توان نوشت:

$$m_\phi = \mu_\phi F_{c\phi} \sqrt{2\rho_r \Delta P_\phi}, \quad (36)$$

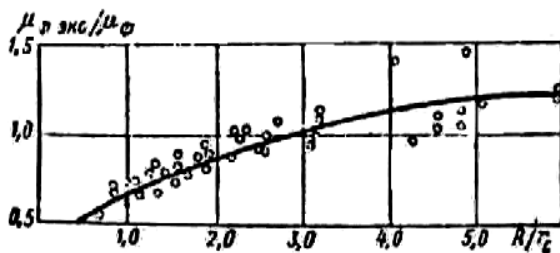
که در آن، $\rho_r = \frac{\rho_0(1+K_m)}{\rho_0 + K_m \rho_F}$ ، μ_ϕ ضریب گذردهی یا

ضریب دبی کل و $F_{c\phi}$ مساحت سطح مقطع جریان مایع در نازل است. بسته به مقدار عبارت $C_c = \frac{R}{r_c}$ ممکن است

انجام تصحیحاتی در ضریب تخلیه لازم باشد. در شکل (۸) گرافی ارائه شده است که رابطه بین ضریب دبی آزمایشی

μ_ϕ و ضریب دبی تئوری μ_ϕ را نسبت به تغییرات $\frac{R}{r_c}$

نشان می‌دهد [۱۳].



شکل ۸: نمودار فاکتور تصحیح ضریب دبی بر حسب

شعاع چرخش به شعاع نازل.

۶ - نتایج طراحی یک انژکتور دو پایه نمونه

براساس تئوری و اصول طراحی، یک کد کامپیوتری نوشته شده است. الگوریتم این کد براساس مراحل طراحی تنظیم شده و با استفاده از داده‌های طراحی، انژکتور را طراحی

انژکتور گریز از مرکز یک پایه عمل می‌کنند. نکته مهم در طراحی این نوع انژکتورها این است که باید شعاع ورتکس گازی انژکتور بیرونی، بیشتر از شعاع خارجی نازل انژکتور مرکزی باشد. با داشتن مشخصات انژکتور بیرونی می‌توان شعاع ورتکس گاز (r_m) را در آن بدست آورد و با توجه به آن ابعاد انژکتور داخلی را به گونه‌ای تعیین کرد که شعاع خارجی نازل انژکتور داخلی، کوچکتر از شعاع ورتکس هوا در انژکتور خارجی شود. همچنین باید در نظر داشت که برای برخورد دو چتر پاشش، باید زاویه مخروط پاشش در انژکتور داخلی بیشتر از انژکتور خارجی باشد.

با این فرض که سیال ایده‌ال است و اختلاف فشار برای احیاکننده و اکسیدکننده یکسان است، می‌توان به روابط زیر دست یافت. نسبت سرعت‌های ورودی احیاکننده و اکسیدکننده برابر است با:

$$\frac{V_{rx0}}{V_{BxF}} = \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_F}}, \quad (31)$$

که در آن ρ_0 دانسیته اکسیدکننده، ρ_F دانسیته احیاکننده، V_{Bx0} و V_{RxF} به ترتیب سرعت‌های ورودی اکسیدکننده و احیاکننده به انژکتور هستند. نسبت دبی جرمی اکسیدکننده به احیاکننده برابر است با [۱۲]:

$$K_m = \frac{m_{\phi 0}}{m_{\phi F}} = \frac{n_0 d_{Bx0}^2 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_F}}}{n_F d_{BxF}^2 \sqrt{\rho_F}}, \quad (32)$$

که در رابطه بالا $m_{\phi 0}$ و $m_{\phi F}$ دبی‌های اکسیدکننده و احیاکننده هستند. همچنین d_{Bx0} و d_{RxF} قطرهای سوراخهای ورودی اکسیدکننده و احیاکننده هستند و n_0 و n_F نیز نشان دهنده تعداد این سوراخها هستند. دبی کل برابر است با:

$$m_\phi = m_{\phi 0} + m_{\phi F} = n_0 \pi r_{Bx0}^2 \rho_0 V_{Bx0}, \quad (33)$$

که در آن:

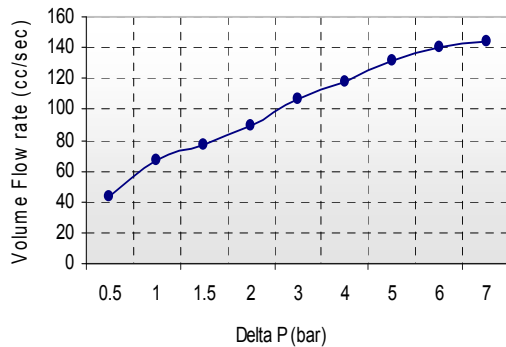
$$r_{Bx} = r_{Bx0} \sqrt{\frac{K_m + 1}{K_m}}$$

قانون بقای ممنتوم زاویه‌ای به صورت زیر در می‌آید. که در آن:

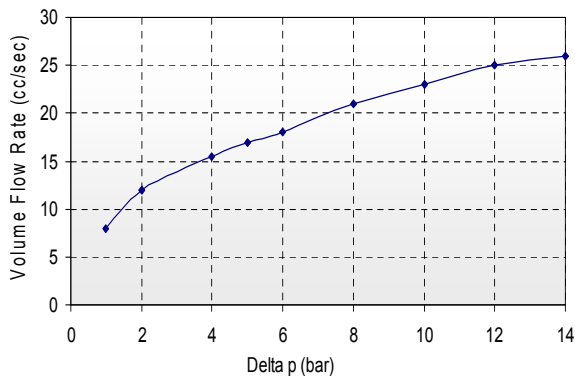
$$M = R V_{Bx} = \bar{R} V_{Bx0}, \quad (34)$$



شکل ۹: انژکتور گریز از مرکز ساخته شده از برنج شامل درپوش، انژکتور داخلی و انژکتور خارجی.



شکل ۱۰: تغییرات دبی انژکتور خارجی بر حسب اختلاف فشار.



شکل ۱۱: تغییرات دبی انژکتور داخلی نسبت به اختلاف فشار.

با تست انژکتورهای تأیید شده در فشارهای مختلف و اندازه گیری پارامترهای پاشش میزان زاویه پاشش هر دو انژکتور، میزان دبی سیال و یکنواختی آن معین خواهد شد. شکل ۱۲ نحوه قرارگیری انژکتور روی استند نشان می دهد. مطابق شکل برای اندازه گیری توزیع دبی و یکنواختی پاشش از کلکتور قطاعی^{۱۸} با قطعهای ۶۰ درجه استفاده شده است.

در شکل‌های ۱۳a و ۱۳b مخروط پاشش حاصل از انژکتور خارجی و داخلی نشان داده شده است. در نتیجه میزان

کرده و ابعاد آن را محاسبه می‌کند. ورودی این کد داده‌های طراحی انژکتور می باشد و ابعاد انژکتور به عنوان خروجی می باشد.

برای طراحی انژکتور دو پایه، باید داده‌های مربوط به انژکتور داخلی و خارجی را به طور جداگانه وارد برنامه کرد تا هندسه آن محاسبه شود. باید به این نکته توجه داشت که شعاع ورتکس در انژکتور خارجی باید بیشتر از شعاع خارجی نازل در انژکتور داخلی باشد. همچنین زاویه چتر پاشش انژکتور داخلی باید بیشتر از انژکتور خارجی باشد تا دو چتر پاشش پس از خروج از انژکتور با یکدیگر برخورد کنند. طبق شرایط طراحی، باید انژکتور داخلی در اختلاف فشار ۱۰ bar، مقدار دبی ۲۰ cc/sec آب را از خود عبور دهد. انژکتور خارجی نیز باید در فشار ۴ bar، بتواند ۱۰۰ cc/sec آب از خود عبور دهد. زاویه چتر پاشش طراحی برای انژکتورهای داخلی و خارجی به ترتیب ۸۵ و ۷۵ درجه در نظر گرفته شده است [۱۴].

۷- ساخت انژکتورها

پس از انجام مراحل دقیق طراحی، چهار عدد از این انژکتورها ساخته شده اند. مطابق شکل ۹ انژکتور دو پایه گریز از مرکز ساخته شده شامل سه جزء انژکتور داخلی، انژکتور خارجی و درپوش جهت بستن قسمت انتهایی انژکتور داخلی می باشد که مونتاژ و بریز شده اند. جهت یکنواختی و معتبر بودن نتایج تستها این انژکتورها از جنس برنج و با دقت بالا ساخته شده اند.

۸- تست سرد انژکتورها

پس از مراحل ساخت، انژکتورها در آزمایشگاه تست سرد پاشش^{۱۷} مورد بررسی قرار گرفته شدند. بدین ترتیب که آزمون فشار برای انژکتور داخلی از فشار صفر تا ۱۴ bar و برای انژکتور خارجی تا میزان ۷ bar انجام شد، که نتایج آنها در نمودارهای ۱۰ و ۱۱ آورده شده است.

¹⁸ - Sector Collector

¹⁷ -Spray Cold Test Lab.

۹- محاسبه خطا

طبق تئوری، مقدار خطای طراحی تا ۱۰٪ می‌تواند باشد. خطای ساخت نیز می‌تواند بسته به دقت وسایل و دستگاههای ساختی تغییر کند. حداکثر خطای دبی بر اثر ساخت را می‌توان از فرمول زیر بدست آورد:

$$\left(\frac{\Delta G}{G}\right)_{\max} = 1.33 \frac{\Delta d_c}{d_c} + 1.34 \frac{\Delta d_{Bx}}{d_{Bx}} + 0.67 \frac{\Delta R}{R} \quad (37)$$

براساس دقتی که در ساخت انژکتورهای به کار رفته، حداکثر خطای ناشی از ساخت تقریباً ۱۶٪ می‌باشد. با احتساب خطای طراحی حداکثر خطای دبی باید ۲۶٪ باشد.

دبی متوسط ۳ انژکتور داخلی در فشار ۱۰ bar، ۲۳.۵۶ $\frac{cc}{sec}$ می‌باشد. بنابراین خطای دبی بدست آمده

۱۷/۸٪ خواهد بود که این خطا کمتر از ۲۶٪، یعنی خطای حداکثر پیش‌بینی شده است. با کم کردن خطای ساخت و دقیق‌تر ساختن قطعات می‌توان خطای دبی را کاهش داد. چتر پاشش این انژکتورها تقریباً در فشار ۱ bar از حالت زنگوله‌ای به شکل مخروطی تبدیل می‌شود.

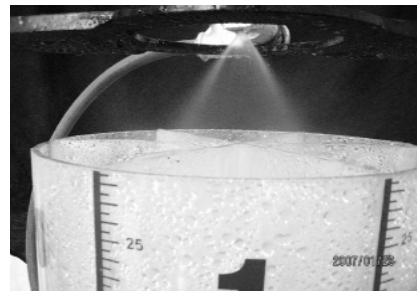
در شکل ۱۰ نیز نمودار تغییرات دبی انژکتورهای خارجی بر حسب اختلاف فشار آورده شده است. طبق نتایج بدست آمده متوسط دبی این انژکتورها در فشار طراحی، یعنی ۴ bar، برابر ۱۱۸.۵ $\frac{cc}{sec}$ می‌باشد. بنابراین خطای دبی حاصل ۱۸/۵٪ می‌باشد که این خطا کمتر از حداکثر خطای پیش‌بینی شده یعنی ۲۶٪ می‌باشد. چتر پاشش این انژکتورها تقریباً در فشار ۰.۱۶ bar از حالت زنگوله‌ای^{۱۹} به شکل مخروطی تبدیل می‌شود [۱۵].

۱۰- تحلیل نتایج

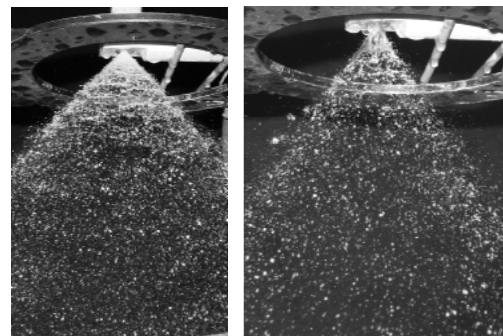
نتایج حاصل از تست خصوصیات پاشش انژکتور دو پایه گریز از مرکز طراحی و ساخته شده در اشکال ۱۰ الی ۱۴ ارائه شده است.

• شکلهای ۱۲a و ۱۲b مخروط پاشش حاصل از انژکتور خارجی و داخلی نشان داده شده است. همانطور که مشخص است میزان زاویه مخروطهای پاشش انژکتور داخلی و خارجی به ترتیب برابر ۹۰ و ۸۰ درجه است

زاویه مخروطهای پاشش نازل داخلی و خارجی حاصل از سیستم عکس برداری فوق سریع به ترتیب برابر ۷۵ و ۸۵ درجه است که مطابق با مقدار پیش‌بینی شده طراحی است. همچنین نتایج حاصل از تست انژکتور در فشارهای $P_{ox}=4 \text{ bar}$ و $P_f=10 \text{ bar}$ با کلکتور قطاعی بصورت نمودار در شکل (۱۴) رسم شده است.



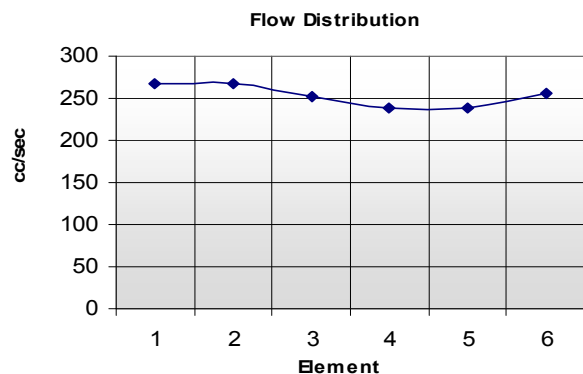
شکل ۱۲: نمایش سیستم تست سرد انژکتور به همراه کلکتور قطاعی جهت اندازه گیری دبی و یکنواختی پاشش.



(b)

(a)

شکل ۱۳: نمایش مخروط پاشش: (a) نازل خارجی ($2\alpha=75^\circ$) (b) نازل داخلی ($2\alpha=85^\circ$).



شکل ۱۴: آزمایش چتر پاشش انژکتور دو پایه گریز از مرکز در فشار $P_{ox}=4 \text{ bar}$ و $P_f=10 \text{ bar}$ با کلکتور قطاعی.

¹⁹ -Tulip Shape

مراجع

1. Ditiakin, E.F., Koliachko, L.F., Noikov, B.V., and Yagodkin, V.E. "Fluids Spray", Moscow, 1977.
 2. Zahao, Y.H., Hou, M.H., and Chin, J.S., "Drop Size Distribution from Swirl and Air-blast Atomizer", Atomization and Spray Technology, pp. 3-15, 1986.
 3. Vasiliov, A.P., Koderaftsov, B.M., Korbatinkov, B.D., Ablintsky, A.M., Polyayov, B.M., and Palvian, B.Y., "Principles of Theory and Calculations of Liquid Fuel Jet", Moscow, 1993.
 4. Paie, B.U. and Nijaquana, B.T., "The Characterization of Spray", The 2nd Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray System, pp.1-4, 1982.
 5. Dorfner, V., Domnick, J., Drust, F., and Kohler, R., "The Viscosity and Surface Tension Effects in Pressure Swirl Atomization", Atomization and Spray, Vol. 5, pp. 261-285, 1996.
 6. Ranganadha, B.K. and Vnarayanaswmy M., "Prediction of Mean Drop Size from Swirl Atomizer", The 2nd Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray System, pp. 3-4, 1982.
 7. Giffen E. and Muraszew A., "The Atomization of Liquid Fuel", Chapman & Hall, 1953.
 8. Tate, R.W., "Spray Patternation", Ind. Eng. Chem, Vol.52, No.10, pp. 49-52, 1960.
 9. Taylor, D.H. and Walsham, B.E., "Combustion Processes in a Medium Diesel Engine", The Inst. Eng., Vol. 184, Part J, pp. 67-76, 1970.
 10. Reitz, R.D. Bracco, F.V., "Mechanisms of Breakup of Round Liquid Jets", The Encyclopedia of Fluid Mechanics, Cheremisnoff N., Gulf Publishing, Houston, Texas, Vol. 3, Chapter 10, pp. 233-249.
 11. Mashayek, F. and Ashgriz, N., "A Hybrid Finite Element-Volume of Fluid Method for Simulating Liquid Atomization", The 6th Annual Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems, Worcester, Massachusetts, pp. 225-229, 1993.
 12. Sutton G.P., "Rocket Propulsion Elements", 15th Edition., John Wiley & Sons, 1986.
- که مطابق با مقدار پیش بینی شده از محاسبات طراحی می باشد.
 - نمودار تجربی انژکتورهای داخلی و خارجی ساخته شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ برای فشارهای مختلف ترسیم شده است. از این آزمایش نتیجه می شود هر چه فشار افزایش یابد میزان دبی به سمت مقدار ثابتی میل می کند که اگر در این مقدار ثابت باز هم فشار افزایش یابد انژکتور تغییر شکل می دهد و از حالت مورد نظر در طراحی خارج می شود.
 - همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، با آزمایش انژکتورهای ساخته شده در مجموعه تست و کلکتور قطاعی مشخص شد که کیفیت اسپری به لحاظ یکنواختی توزیع پاشش قابل قبول است.
 - براساس نتایجی که از تست به دست آمده، برای طراحی انژکتورهای گریز از مرکز دو پایه مایع- مایع، می توان از روش طراحی یاد شده در این مقاله استفاده کرد. همچنین کد کامپیوتری که براساس این روش طراحی نوشته شده است قابل قبول است.
 - برای کاهش خطا در توزیع دبی پاشش، ابتدا باید خطای ناشی از ساخت را به حداقل رساند. خطای طراحی را نیز می توان به روش زیر کم کرد. انژکتوری که با دقت مطلوب ساخته شده است، تست می شود و درصد خطای دبی آن محاسبه می شود. بعد از آن با استفاده از فرمول تعیین خطای دبی، محاسبه می شود که بازاء چه مقادیری از Δd_c ، ΔR و Δd_{BX} می توان به این درصد خطا رسید. پس از آن به اندازه مقادیر ΔR ، Δd_c و Δd_{BX} بدست آمده، تغییرات لازم در هندسه انژکتور ایجاد می شود تا دبی مورد نظر بدست آید.
 - جهت بررسی تأثیر وجود انژکتور داخلی، تست دیگری انجام شد. بدین صورت که ابتدا قطعه ای که بتواند جایگزین انژکتور داخلی شود، ساخته شد. این قطعه به جای انژکتور داخلی، در انژکتور خارجی مونتاژ شد و انژکتور خارجی مورد تست قرار گرفت. طبق این آزمایش مشخص شد که تغییر دبی چندانی وجود نخواهد داشت. به عبارتی دیگر وجود نازل انژکتور داخلی، تأثیری بر مسیر و حرکت سیالی که در انژکتور خارجی حرکت می کند، ندارد.

- liquid Rocket Engines”, AIAA Paper 91-0283.
15. Parlange J.Y. “A Theory of Water-Bells”, J. Fluid Mech., Vol. 29, Part 2, 1967.
 13. Bazarov, V.G. and Yang, V., “Liquid Propellant Rocket Engine Injector Dynamics”, J. Propulsion and Power, Vol. 14, No. 5, 1998.
 14. Ghafourian, A., Mahalingam, S., and Dindi, H., “A Review of Atomization in