

مطالعه تجربی مشخصات اسپری یک نوع صفحه انژکتور موتور موشک سوخت مایع با استفاده از نتایج تست سرد

فتح اله امی^{۱*}، امیر کارگر^۲ و سید مصطفی حسینعلی پور^۳

۱ و ۲- دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی مهندسی، آزمایشگاه موتور و پیشرانش
 ۳- آزمایشگاه CAE دانشگاه علم و صنعت ایران

*ایران- تهران- صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۵

fommi@modares.ac.ir

پاشش بهینه انژکتورها و توزیع یکنواخت دبی سوخت در صفحه انژکتور موتور موشک سوخت مایع از پارامترهای اساسی در تعیین نیروی پیشرانش و پایداری احتراق است. عبور هر دو سیال عامل احیاکننده و اکسیدکننده در انژکتورهای دو مؤلفه باعث می شود که بتوان بدون افزایش قطر صفحه انژکتور دبی سیال سوخت را افزایش داد که این امر موجب بالا رفتن فشار گازهای حاصل از احتراق و نیروی پیشرانش خواهد شد. در این تحقیق تعدادی انژکتور دو مؤلفه پیچشی و یک نمونه صفحه انژکتور مسطح دایروی یک موتور موشک آزمایشگاهی ساخته شده است. سپس با استفاده از سامانه تست سرد انژکتور و صفحه انژکتور ساخته شده، مشخصه‌های اسپری انژکتورها و صفحه انژکتور شامل زاویه پاشش، نحوه توزیع دبی سیال در فشارهای مختلف اندازه‌گیری شده است. نتایج تجربی تست سرد حاکی از آن است که مشخصه‌های اسپری پاشش انژکتور و صفحه انژکتور مانند زاویه پاشش، توزیع و میزان دبی و یکنواختی اسپری مطابق انتظار است.

واژه‌های کلیدی: انژکتور دو مؤلفه پیچشی، صفحه انژکتور، اتمیزاسیون، اسپری، تست سرد

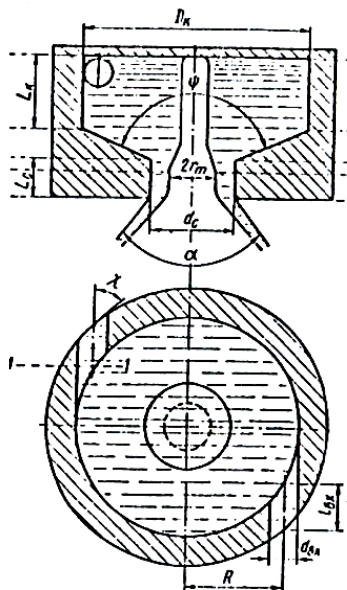
مقدمه

موتورهای موشک سوخت مایع به دلیل دارا بودن میزان تراست بالا و ایمپالس ویژه مناسب، سبب افزایش کاربرد آنها نسبت به سایر موشک‌ها شده است. از طرفی اتمیزاسیون بهینه و توزیع یکنواخت پیشرانها در محفظه احتراق موتور موشک از عوامل بسیار مؤثر در نیروی پیشرانش و پایداری احتراق است. به عبارت دیگر نحوه پاشش سوخت در محفظه احتراق موتورهای احتراقی مهم‌ترین شاخص راندمان و اتمیزاسیون قطرات است. بنابراین با توجه به کاربرد این نوع موتورها موضوع کیفیت پاشش صفحه انژکتور

اهمیت خاصی دارد [۱]. مزایای گوناگون انژکتورهای پیچشی دو مؤلفه^۱ مانند قابلیت ایجاد چتر پاشش با زاویه پاشش دلخواه و ایجاد ذرات سیال بسیار ریز که سبب کاهش طول محفظه، وزن موتور و افزایش برد موشک می‌شود، باعث افزایش کاربرد این نوع انژکتورها در صنایع موشکی شده است. به عبارت دیگر استفاده از انژکتورهای پیچشی سبب ایجاد پدیده چرخش^۲ سیال و در نتیجه افزایش مومنتوم زاویه‌ای و بهبود شکست در جت سیال می‌شود. در نتیجه سیال به لایه‌های نازک‌تر تبدیل و سبب کوچک شدن

1. Double-base Swirl Injectors
 2. Swirl Effect

بقای جرم، اصل بقای اندازه حرکت زاویه‌ای، اصل بقای انرژی یا معادله برنولی و اصل حداکثر دبی یا حداقل انرژی.



شکل ۲- برش انژکتور پیچشی [۱]

نتایج حاصل از محاسبات انژکتور دو مؤلفه پیچشی در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- پارامترهای هندسی انژکتور داخلی و خارجی

انژکتور داخلی (احیاکننده)	انژکتور خارجی (اکسیدکننده)
زاویه کانال ورودی: ۷۰	زاویه کانال ورودی: ۱۱۰
زاویه مخروط پاشش: ۹۰	زاویه مخروط پاشش: ۸۰
اختلاف فشار کاری: ۱۰ bar	اختلاف فشار کاری: ۴ bar
دبی جرمی: ۲۰ gr/sec	دبی جرمی: ۱۱۰ gr/sec
تعداد کانال ورودی: ۲	تعداد کانال ورودی: ۴
قطر کانال ورودی: ۱.۱ mm	قطر کانال ورودی: ۲.۰۷ mm
قطر نازل: ۱.۸۳ mm	قطر نازل: ۴.۲۸ mm

پس از محاسبات مختلف طراحی تعدادی انژکتور دو مؤلفه برای استفاده در صفحه انژکتور ساخته شده است. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده می‌شود این انژکتور از سه قسمت تشکیل شده است: انژکتور داخلی، انژکتور خارجی و درپوش که داخل هم مونتاژ و بریز می‌شوند. انژکتور داخلی برای پاشش سیال احیاکننده و انژکتور خارجی برای پاشش سیال اکسیدکننده در فشار و دبی تعریف شده طراحی و ساخته شده است. برای اینکه این انژکتورها بتوانند روی صفحه انژکتور به راحتی نصب یا در صورت بروز مشکلاتی از جمله گرفتگی منافذ و تغییر شکل

اندازه قطرات سیال و افزایش زاویه مخروط اسپری می‌شود [۲]. دو عامل مهم در تسریع اتمیزاسیون بهینه سیال در انژکتور پیچشی عبارتند از:

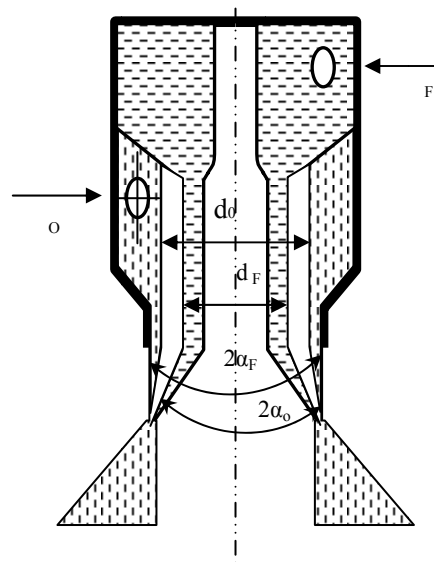
الف- جریان توربولانس در انژکتور

ب- ضخامت نازک لایه سیال عامل

طراحی و ساخت انژکتور پیچشی دو مؤلفه

در انژکتور جریان مستقیم قطر قطرات خروجی در شروع تابعی از قطر نازل خروجی انژکتور جریان مستقیم است ولی در انژکتور پیچشی قطر قطرات به ضخامت لایه سیال بستگی دارد که هرچه نازک‌تر باشد قطر ذرات کوچک‌تر می‌شوند بنابراین در حالت مشابه انژکتور جریان مستقیم و پیچشی با قطر نازل خروجی یکسان، انژکتور پیچشی برای دستیابی به ذرات مایع با قطر کوچک‌تر مناسب‌تر است [۳].

شکل (۱) شمای یک انژکتور دو مؤلفه مخلوط در خارج را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص شده پارامتر d_o قطر نازل اکسیدکننده، d_f قطر نازل احیاکننده، و O و F به ترتیب روزنه ورودی اکسیدکننده و احیاکننده است.



شکل ۱- شمای یک انژکتور دو مؤلفه مخلوط در خارج

روش طراحی بر این اساس بنا شده است که با توجه به تئوری انژکتور پیچشی ابتدا معادلات براساس قوانین مکانیک سیالات برای سیال ایده‌آل حل شده و سپس با استفاده از یک سری ضرایب و منحنی‌های تجربی اصلاح می‌گردد. قوانین مورد استفاده در تئوری انژکتور گریز از مرکز عبارتند از: اصل

- چگالی ترکیبات سوخت $\rho = 1.353 \text{ [kg/sec]}$ فشار پشت محفظه اکسیدکننده و احیاکننده هر انژکتور به ترتیب برابر 4 bar و 10 bar است.

- فشار گاز در محفظه احتراق $P_K = 5 \text{ [MPa]}$

- فشار گاز در دهانه نازل $P_a = 0.005 \text{ [MPa]}$

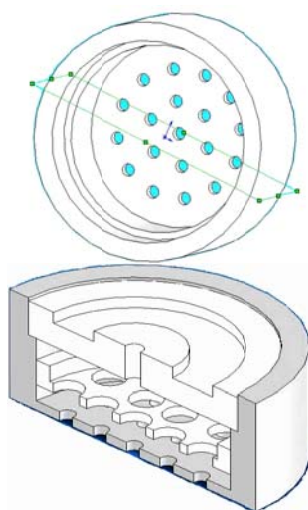
- ضریب گسترش نازل $\varepsilon = \frac{P_K}{P_a} = \frac{5}{0.005} = 1000$

- دبی انژکتور اکسیدکننده و احیاکننده به ترتیب برابر 20 و 110 cc/sec .

- نظم انژکتورها به صورت دایروی هم مرکز و فاصله گام بین آنها در جهت شعاع، یکسان و برابر $h = 20 \text{ mm}$ است.

- مطابق شکل (۴) صفحه انژکتور دارای قطر 150 mm و دارای دو محفظه مجزا برای دو سیال اکسیدکننده و احیاکننده است.

- تعداد انژکتورها برابر $n = 19$ و نوع آنها به صورت پیچشی دو مؤلفه ترکیب در خارج است.



شکل ۴- نمای مدل سه بعدی برش خورده صفحه انژکتور دایروی

همان‌طور که در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) نشان داده می‌شود؛ صفحه انژکتور مورد نظر از جنس $Al-7075$ ، که تحمل خوبی در فشارهای کاری دارد، ساخته شده و از سه قسمت تشکیل شده است. بدنه خارجی، پولک جداکننده و در پوش صفحه انژکتور. بدین ترتیب دو محفظه کاملاً مجزا ایجاد می‌شود که پاشش سیال اکسیدکننده از محفظه پائینی و برای سیال احیاکننده از محفظه بالایی انجام می‌شود. جهت آب‌بندی کامل صفحه انژکتور از آرینگ و چسبهای آب‌بندی مخصوص استفاده شده است.

احتمالی، قابل تعویض و بازرسی باشند قسمت خارجی آنها قلاویز شده است.



شکل ۳- انژکتور پیچشی ساخته شده از جنس برنج

طراحی و ساخت صفحه انژکتور

به‌طور کلی صفحه انژکتور به سه شکل صفحه انژکتور مسطح، گنبدی و کروی ساخته می‌شود که امروزه، صفحه انژکتور مسطح به دلیل سهولت در ساخت بیشترین کاربرد را دارد. ولی به علت مساحت کمتر این نوع صفحه نسبت به دو نوع دیگر، تعداد انژکتور کمتری روی آن قرار می‌گیرد [۴].

یک صفحه انژکتور مناسب باید به گونه‌ای باشد که:

۱. تأمین‌کننده حداکثر مقدار انرژی باشد. یعنی مشخصه‌های انرژی که عبارتند از ایمپالس ویژه I_s و سرعت مشخصه β حداکثر مقدار را داشته باشند.

$$I_s = K_T \beta \quad (1)$$

مقدار تجربی ضریب $K_{T,e}$ در موتورهای با احتراق مجدد بین $1/6$ تا $1/7$ و در موتورهای بدون احتراق مجدد بین $1/3$ تا $1/35$ است.

۲. زمان عملکرد صفحه انژکتور بیش از زمان عملکرد موتور باشد.

۳. طراحی صفحه انژکتور باید به گونه‌ای باشد که حداقل وزن را داشته باشد.

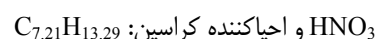
۴. طرحی به گونه‌ای باشد که با فناوری موجود قابل ساخت باشد.

۵. چیدمان انژکتور در صفحه انژکتور نیز به سه صورت می‌تواند باشد. این سه نوع آرایش عبارتند از: آرایش شطرنجی^۳، شش ضلعی^۴ و آرایش دایروی.

در این تحقیق طراحی، مدل‌سازی و ساخت صفحه انژکتور مسطح دایروی برای یک موتور موشک آزمایشگاهی با مشخصات ذیل انجام شده است.

- تراست موتور موشک سوخت مایع برابر است با: $T = 7 \text{ KN}$

- ترکیبات سوخت شامل: اکسیدکننده اسید نیتریک:



3. Symmetric Arrangement

4. Hexagonal Arrangement

۳. دو مخزن نگهدارنده با قابلیت تحمل سیال تحت فشار

۴. کپسول نیتروژن با فشار گاز بالا

۵. مانومتر و رگولاتور، شیلنگ و اتصالات جهت کار در فشار بالا

۶. کلکتور شعاعی و قطاعی

۷. استروبو سکوپ و دوربین عکاسی با قابلیت عکس برداری سریع

در این تحقیق برای تأمین فشار از مخازن تحت فشار نیتروژن N_2 با درجه خلوص بالا و فشار ۱۵۰ bar استفاده شده است. علت انتخاب گاز N_2 بی‌اثر بودن این گاز بر روی پاشش و همچنین کم‌خطر بودن آن نسبت به سایر گازهاست. بدین ترتیب هوای فشرده شده درون کپسول با عبور از شیر یکطرفه و رگولاتور به روی مخازن دو سیال می‌رسد. برای ایمنی بیشتر مخازن نگهدارنده آب و نفت، فشارشکن‌های ویژه‌ای (فشار بازکنندگی سوپاپ برابر ۱۴ bar) در بالای این مخازن نصب شده‌اند. دو سیال از مسیرهای جداگانه و پس از عبور از مسیر هیدرولیکی و شیرهای دستی به دو محفظه پشت انژکتورها می‌رسند. دو گیج فشار برای خواندن فشار دو مخازن قبل از انژکتورها تعبیه شده است. تعداد ۱۹ انژکتور پیچشی دوماولفه که به‌طور دایروی در صفحه انژکتور پیچ شده، استفاده شده است. دو نوع کلکتور شعاعی و قطاعی جهت اندازه‌گیری دبی دو سیال در جهات r و θ ساخته شده است که در اشکال (۸) و (۹) نشان داده شده است. قطر هر دو کلکتور برای جلوگیری از پخش شدن ذرات پودر شده سیال و همچنین امکان تغییر فاصله صفحه انژکتور تا کلکتورها، دو برابر قطر صفحه انژکتور یعنی 30 cm در نظر گرفته شده است. کلکتور شعاعی به شش قطاع 60° و استوانه ای به سه استوانه به شعاع‌های ۱۰، ۲۰ و 30 سانتی متری تقسیم شده است. همچنین برای ثبت زاویه پاشش و مشاهده تمرکز ذرات اتمیزه شده اسپری از یک دوربین عکاسی با قابلیت عکسبرداری سریع استفاده شده است.



شکل ۸- شماتیک کلکتور شعاعی ساخته شده



شکل ۵- نمایش خروجی صفحه انژکتور دایروی



شکل ۶- نمای قرارگیری انژکتورها دایروی درون پولک جداکننده



شکل ۷- نمایش محل قرارگیری انژکتورها در صفحه انژکتور

Set-Up آزمایشگاه تست سرد پاشش

جهت اطمینان از یکنواختی پاشش انژکتورها و صفحه انژکتور و به عبارتی کنترل کیفیت پاشش به آزمایشگاه تست سرد پاشش^۵ نیاز است. در این آزمایشگاه می‌توان مطالعات تجربی پیرامون تست انواع انژکتور و صفحه انژکتور، اندازه‌گیری و بررسی پارامترهای ماکروسکوپی^۶ پاشش مانند زاویه اسپری، طول مخروط پاشش، کیفیت توزیع اسپری و فاصله منطقه شکست سیال^۷ تا نازل انژکتور را انجام داد.

برای انجام آزمایش‌های پاشش انژکتور و صفحه انژکتور به تجهیزات مختلفی نیاز است که عبارتند از:

۱. استند انژکتور و صفحه انژکتور

۲. میز تست

5. Spray Cold Test Laboratory
6. Macroscopic Parameters
7. Liquid Break-up Region

۴. پاشش یکنواخت سیال در محفظه با ثبات دبی پاشش
۵. پاشش یکسان سیال در چتر پاشش
۶. پاشش یکسان و همگن ذرات سیال روی چتر پاشش

نتایج تست سرد پاشش انژکتور

با نصب انژکتور روی استند، تنظیم فشار اکسیدکننده و احیاکننده به مقادیر نامی و استفاده از سیستم عکس برداری و استروسکوپ اشکال ۱۰ الی ۱۲ به دست می‌آید که قابل بحث و مطالعه است.



شکل ۹- شماتیک کلکتور قطاعی ساخته شده



شکل ۱۰- نمایش زاویه چتر پاشش تشکیل شده از نازل داخلی



شکل ۱۱- نمایش زاویه چتر پاشش تشکیل شده از نازل خارجی



شکل ۱۲- نمایش حات کاملاً توسعه یافته Fully developed چتر پاشش انژکتور در فشار نامی

انتخاب سیال سوخت

به طور کلی استفاده از اکسیدکننده و احیاکننده واقعی موتور برای انجام تست صفحه انژکتور در فشار بالا بسیار خطرناک و به عبارتی غیر ممکن است. زیرا اغلب آنها به صورت خودمشتعل هستند. بنابراین تست پاشش در آزمایشگاه معمولاً با سیال آب و نفت انجام می‌شود. انتخاب سیال جایگزین به گونه‌ای باید باشد که خواص ترموفیزیکی آن به سوخت واقعی موتور نزدیک باشد. در این میان پارامتری که به طور جدی در پاشش تأثیر می‌گذارد ویسکوزیته سینماتیکی است. در جدول (۲) ویسکوزیته سینماتیکی آب به عنوان اکسیدکننده و نفت بجای احیاکننده (سوخت هیدروکربنی RP-1) با هم مقایسه شده‌اند [۲].

جدول ۲- مقایسه خواص آب و نفت به جای اکسیدکننده و احیاکننده

سیال مشخصه	آب	اکسیدکننده	نفت	احیاکننده RP-1
دانسیته kg/m ³	۲/۹۹۸	۱۶۱۵	۷۸۵	۸۰۰
ویسکوزیته سینماتیکی * 10 ³	۱/۰۰۲	۱/۸	۴۵/۰۰	۴۵/۸۷
ویسکوزیته دینامیکی * 10 ³	۱/۰۰۳۸	۱/۱۱۴۶	۰/۵۷۳۲	۰/۵۹۹۳

کنترل کیفیت انژکتور

بعد از ساخت انژکتور، کنترل کیفیت آن در آزمایشگاه تست سرد انجام می‌شود. پارامترهای اصلی و مشخصه‌های عملکرد انژکتور عبارتند از:

۱. دبی جرمی انژکتور m_{Φ}
۲. اختلاف فشار دو طرف انژکتور ΔP
۳. زاویه‌های مخروط پاشش 2α

عدم نشتی تمامی اتصالات و شیرها چک می‌شود. روش انجام آزمایش‌ها بدین صورت است که ابتدا فشار مخازن با بازکردن شیر کپسول نیتروژن و تنظیم آن توسط رگولاتور به میزان مورد نظر رسانیده می‌شود. سپس با بازکردن شیرهای دستی انتهایی دو سیال، پاشش آغاز می‌شود. با شروع آزمایش پارامترهای مختلف از جمله، زمان تست پاشش T، فاصله صفحه انژکتور از کلکتور H، فشار مخازن اکسید و احیا P_{O_2} و P_{F_2} قبل از صفحه انژکتور و در پایان تست مقادیر دو سیال جمع شده و همچنین نسبت آنها در هر قسمت از کلکتورها، برای محاسبه K_m تجربی، ثبت می‌شود. آزمایش‌ها با تغییر فشار کاری پشت انژکتورهای دو سیال ادامه می‌یابد. هر تست با دو کلکتور شعاعی و قطاعی انجام می‌شود و با توجه به مقادیر حجم سیال در قطاع‌ها و استوانه‌های هم مرکز (که شماره‌گذاری شده‌اند) نمودار توزیع چتر پاشش رسم می‌شود. واحد رسم نمودار نسبت حجم سیال در هر کدام از قسمت‌های آزمایش به زمان پاشش است.

نتایج تست سرد پاشش انژکتور و صفحه انژکتور

با نصب صفحه انژکتور روی استند و تنظیم فشار اکسیدکننده و احیاکننده به مقدار نامی نتایج زیر حاصل می‌شود.

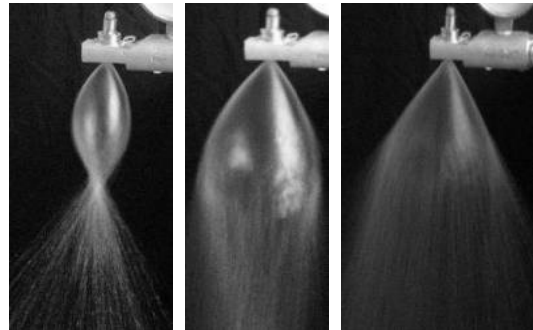


شکل ۱۶- نمایش چتر پاشش تشکیل شده از صفحه انژکتور



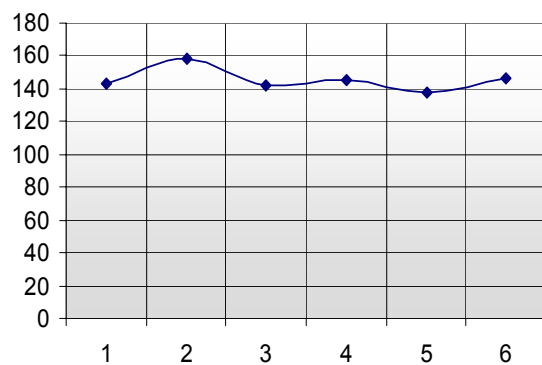
شکل ۱۷- نمایش برخورد چترهای پاشش از صفحه انژکتور

شکل (۱۳) نیز نشانگر نحوه چرخش سیال در انژکتور دومؤلفه پیچشی است.

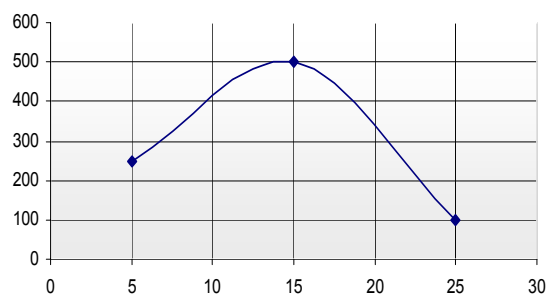


شکل ۱۳- نمایش نحوه چرخش سیال در انژکتور پیچشی

با استفاده از کلکتورهای شعاعی و قطاعی نحوه توزیع دبی سیال در هر قطاع و در هر بخش از استوانه محاسبه می‌گردد که در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است.



شکل ۱۴- توزیع ذرات اسپری شده از انژکتور در جهت θ



شکل ۱۵- توزیع ذرات اسپری شده از انژکتور در جهت r

نحوه انجام آزمایش‌ها

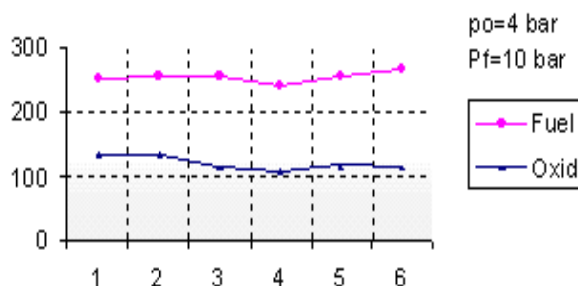
پس از کنترل کیفیت پاشش یکسان قطرات پاشش و همگن بودن ذرات روی شعاع چتر پاشش تمامی انژکتورها، تعداد ۱۹ انژکتور درون صفحه با آرایش دایروی نصب می‌شود. قبل از انجام تست‌ها

پاشش انژکتور دومؤلفه پیچشی است که در این حالت فشار سیال احیاکننده و اکسیدکننده به مقدار نامی خود رسیده است. شکل (۱۳) دقیقاً مراحل چرخش سیال را بر اثر افزایش فشار نشان می‌دهد که این پدیده تأثیر بسزایی در اتمیزاسیون سوخت و کاهش قطر ذرات سوخت در محفظه احتراق و افزایش کیفیت احتراق دارد. در شکل (۱۶) نحوه برخورد و همپوشانی انژکتورهای مرکزی با انژکتورهای محیطی کاملاً مشهود و مورد انتظار است. همچنین با مطالعه فرایند پاشش انژکتورها و صفحه انژکتور ساخته شده در مجموعه تست سرد و کلکتور قطعی که در نمودارهای شکل‌های (۱۴)، (۱۵)، (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) ترسیم شده، مشخص شد که توزیع چتر پاشش اسپری انژکتور و صفحه انژکتور ساخته شده در هر دو جهت Γ و θ همگن و متعادل است.

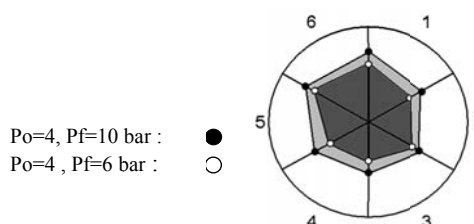
مراجع

- [1] Ditiakin, E. F., Koliachko, L. F., Noikov, B. V. and Yagodkin, V. E., "Fluids Spray," Moscow, 1977.
- [2] Bazarov V. G., "Liquid Propellant Rocket Engine Injector Dynamics," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 14, 1998.
- [3] Ghafourian A., Mahalingam S. and Dindi H., "A Review of Atomization in liquid Rocket Engines," *AIAA Paper*, 91-0283.

[۴] سوخوف، بورکالسوف و امی، فتح‌اله. «مطالعه مشخصات انتشار صفحه انژکتور موتورهای سوخت مایع»، نشریه علمی- پژوهشی دانشگاه صنعتی مسکو، ۱۹۹۶.



شکل ۱۸- توزیع اسپری از صفحه انژکتور در فشار ۴ و ۱۰ بار



شکل ۱۹- نمودار شماتیک توزیع چتر پاشش صفحه انژکتور

نتیجه گیری

همان‌طور که در تصاویر شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است، میزان زاویه مخروط‌های پاشش انژکتور داخلی و خارجی به ترتیب برابر ۹۰ و ۸۰ درجه است که مطابق با مقدار پیش‌بینی شده از محاسبات طراحی است. شکل (۱۲) نیز نمایانگر باز شدن چتر