

تعیین محدوده مناسب عملکردی انژکتورهای مورد استفاده در محفظه احتراق گردابه‌ای موتور سوخت مایع به روش تجربی

اسماعیل ولی‌زاده^۱، سید مجتبی موسوی نائینیان^۲

۱ دانشجوی دکتری، دانشکده هوافضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، e-valizadeh@mail.kntu.ac.ir

۲ دانشیار، دانشکده هوافضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۱۹

چکیده

محفظه احتراق گردابه‌ای نسل جدید محفظه موتوره‌ای سوخت مایع است که در آن با چیدمان متفاوت انژکتورها، یک جریان گردابه‌ای درون محفظه احتراق ایجاد می‌کنند. این گردابه کمک زیادی به خنک‌کاری و افزایش میزان اختلاط مولفه‌های پیش‌رانه در محفظه احتراق می‌کند و می‌توان در یک محفظه با حجم کوچک، احتراقی کامل ایجاد نمود. در این نوع محفظه‌ها چند نوع انژکتور در نقاط مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد که شامل انژکتورهای گریز از مرکز، جریانی و گردابه‌ای (مماسی) می‌باشند. در پژوهش حاضر، طراحی و آزمون تجربی این انژکتورها جهت بررسی تأثیر پارامترهای هندسی آنها بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی با استفاده از سیال عامل آب انجام شده است. نحوه تشکیل اسپری، اندازه‌گیری دبی، افت فشار و زاویه پاشش انژکتور از جمله مشخصه‌های هیدرودینامیکی است که بررسی شده‌اند. نتایج حاکی از تطابق قابل قبول پیش‌بینی‌های طراحی و عملکرد انژکتورهاست. بر این اساس، ضمن انتخاب انژکتورهای گریز از مرکز و جریانی پاشنده سوخت و اکسیدکننده به محفظه، نشان داده شده است که افزایش تعداد انژکتورهای مماسی گردابه‌ای تا شش عدد، یکنواختی بیشتری در جریان بالارونده از محفظه گردابه‌ای ایجاد می‌کند، اما زاویه ورودی آنها تا ۵ درجه تأثیر چندانی بر بالاروندگی ندارد.

واژگان کلیدی

محفظه احتراق موتور سوخت مایع، محفظه احتراق گردابه‌ای، انژکتور گریز از مرکز، محدوده عملکرد، روش تجربی

۱. مقدمه

بر این، نوع انژکتورها و توزیع آن در صفحه باید به گونه‌ای باشد که بهترین توزیع شدت دبی و نسبت اکسیدکننده به سوخت را در

مأموریت انژکتورها در موتوره‌ای سوخت مایع تبدیل پیش‌رانه به قطراتی با قطر مناسب و آماده‌کردن آن برای احتراق است. علاوه

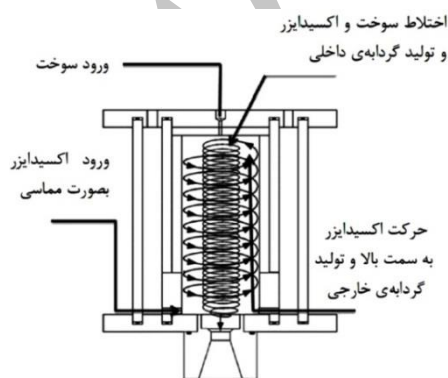
صفحه انژکتور تأمین کند تا فرایند احتراق با بازده بیشینه صورت پذیرد [۱]. از سوی دیگر، زاویه اسپری در سیستم‌های احتراقی تأثیر زیادی بر بازده احتراق، محدوده خاموشی شعله و انتشار آن دارد [۲]. آگاهی داشتن از زاویه چتر پاشش نیز - با توجه به اثری که در اختلاط سوخت و اکسیدکننده و اختلاط چتر پاشش انژکتورهای مجاور در صفحه انژکتور دارد - حائز اهمیت است. هر اندازه بتوان این فرایندها را در حجم کمتر محفظه احتراق مدیریت نمود، وزن محفظه کمتر خواهد بود که در دیدگاه هوافضایی مسئله مهمی است.

فرایند پاشش و تشکیل قطره در محفظه احتراق موتورها، نحوه تبدیل مایع خروجی از نازل انژکتور به قطرات و همچنین زاویه پاشش در فشارهای پشت متفاوت همیشه مورد علاقه و مطالعه پژوهشگران بوده است. در پژوهش سیواکومار و راقانداندان (۱۹۹۸)، در یک انژکتور پیچشی مایع - مایع از نوع هم‌محور، اثر اندرکنش اسپری‌ها بر زاویه اسپری و طول شکست، با پردازش تصاویر پاشش بررسی شده است [۳]. داده‌های تجربی حاصل برای اسپری درونی و بیرونی به صورت مجزا، با داده‌های به دست آمده از اسپری ترکیبی آنها متفاوت است؛ که نشان‌دهنده تأثیر تداخل اسپری، بر خصوصیات هر یک از اسپری‌هاست. آنها همچنین نقش پارامترهای هندسی بر اندازه قطرات یک انژکتور هم‌محور پیچشی مایع - مایع را مطالعه و گزارش کرده‌اند که در محدوده شرایط آزمایش، تداخل اسپری‌ها سبب افزایش ۴۰ تا ۵۰ درصدی اندازه متوسط قطرات نسبت به حالت مجزای اسپری‌ها شده است. در پژوهش دیگر، زاویه اسپری، یکنواختی پاشش و توزیع قطر قطرات یک انژکتور هم‌محور پیچشی سه سیاله توسط رامامورتی و مدهاوان مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها با تست سرد در محدوده ۲ تا ۸ بار انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که یکنواختی پاشش گذرگاه درونی با افزایش فشار کاهش می‌یابد [۴].

مطالعه تجربی دیگری با روش PDA روی مشخصات پاشش آب بعد از شکسته شدن آن به قطرات ریز توسط شن انجام شده که در آن قطر و سرعت قطرات آب اندازه‌گیری شده و تقارن پاشش مورد مطالعه قرار گرفته است [۵]. اسپچیمت و همکاران در مطالعه‌ای فرایند پاشش و تشکیل قطره را در ناحیه شکست مایع پیوسته به مایع گسسته بعد از خروج آن از انژکتور پیچشی مورد بررسی قرار دادند [۴]. آنها همچنین نتایج تجربی را با کار عددی

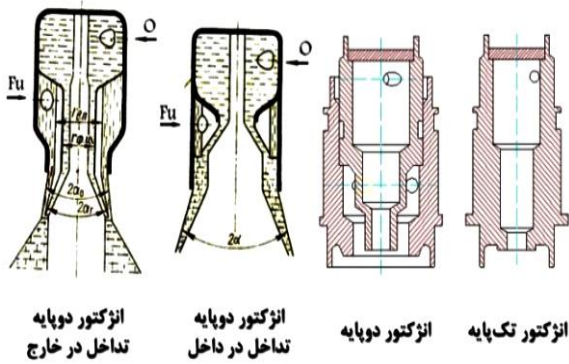
مقایسه کرده‌اند. مدل آنها در مقایسه با نتایج تجربی مناسب بود [۴]. ریتز و براکو مکانیزم اتمیزاسیون را به همراه رابطه‌ای برای محاسبه زاویه اسپری بیان کردند [۶]. مک کارتی و ملوی تحقیقاتی درباره پایداری جت سیال و تأثیر آن در نازل انژکتور انجام دادند [۷]. تیت [۸] در انژکتورهای دوپایه گریز از مرکز گاز - مایع تحقیقات ارزنده‌ای را پیرامون نحوه نفوذ انجام داد. زاهو و همکاران [۹] نحوه توزیع پاشش و اندازه قطرات در انژکتور گریز از مرکز و واسیلیوف و کودریاتسوف [۹] نحوه توزیع پاشش انژکتورها را در صفحه انژکتور بررسی کردند.

در داخل کشور نیز تحقیقات گسترده‌ای درباره انژکتورها انجام شده است. امی، بورکالسوف و سوخوف پاشش صفحه انژکتور مربوط به یک میکروموتور موشک سوخت مایع را مورد مطالعه قرار دادند [۱۰]. در سامانه‌های پیشران شیمیایی متداول، معمولاً انژکتورها سوخت و اکسیدکننده را از صفحه بالای محفظه احتراق (صفحه انژکتور) به درون محفظه تزریق می‌کنند و پس از فروپاشی جریان، اختلاط فاز مایع، تبخیر، اختلاط فاز گاز و احتراق؛ گاز داغ تولید می‌شود که با حرکت در طول نازل، انرژی گرمایی آن به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود و تکانه جت خروجی، سامانه را به پیش می‌راند [۱۱]. در فناوری جدید به کار رفته در محفظه احتراق سیستم‌های پیشران شیمیایی، با چیدمان متفاوت انژکتورها، یک جریان گردابه‌ای درون محفظه احتراق ایجاد می‌کنند که این گردابه به خنک‌کاری و افزایش میزان اختلاط مؤلفه‌های پیشران در محفظه احتراق کمک زیادی می‌کند و می‌توان در یک محفظه با حجم کوچک یک احتراق کامل ایجاد نمود (شکل ۱) [۱۲].



شکل ۱. نمایش شماتیک از محفظه احتراق گردابه‌ای [۱۲]

ایده اصلی میدان جریان گردابه‌ای، که در موتور گردابه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است، ناشی از ایده بیل نات، سرمهندس شرکت اوربیتک^۱ و همکاران وی بوده است. آنان چندین کار



شکل ۳. تقسیم بندی انژکتورها [۱۰]

۳. پدیده فروپاشی و تشکیل زاویه پاشش سیال

با افزایش فشار، فروپاشی و تشکیل زاویه پاشش در انژکتورها می‌تواند به ترتیب زیر رخ دهد [۱۶]:

- سیال به صورت یک جت یک پارچه و پیوسته از انژکتور خارج می‌شود و در فاصله نسبتاً زیادی از آن، به قطرات درشت فروپاشیده می‌شود. زاویه پاشش در این حالت کم است (شکل ۴-۱).

- با کمی افزایش فشار، سیال به صورت یک حباب گلابی شکل بزرگ و شفاف - که دارای یک گره است - از انژکتور خارج و از همین گره، فروپاشی جت آغاز می‌گردد. گاهی جت جریان، شکل دو زنگوله متوالی پیدا می‌کند (شکل ۴-۲).

- در مرحله افزایش فشار، سیال به صورت یک چتر لاله‌ای شکل شفاف و یک بخش استوانه‌ای - که کمی تیره‌تر است - ظاهر می‌گردد. دقیقاً از لبه همین استوانه، جریان از چتر اصلی جدا و به قطرات نسبتاً درشت تبدیل می‌گردد (شکل ۴-۳).

- در ادامه اگر فشار باز افزایش یابد، سیال به صورت یک مخروط لاله‌ای شکل شفاف از انژکتور خارج می‌گردد. از روی لبه‌های نوسانی و موج‌دار همین مخروط، جریان به صورت قطراتی با ابعاد مختلف جدا می‌گردد (شکل ۴-۴).

- با افزایش دوباره فشار، کیفیت پاشش مانند حالت قبل است؛ اما دیگر از آن لایه شفاف، یک پارچه و نازک خبری نیست (شکل ۴-۵).

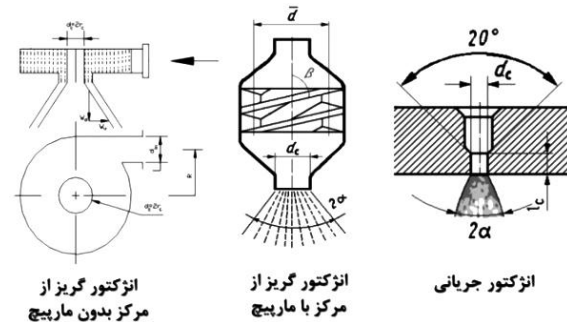
- با رسیدن فشار به مقدار طراحی، کیفیت پاشش به صورت محسوسی بهبود و تعداد قطرات کوچک افزایش می‌یابد. ویژگی متمایزکننده این مرحله آن است که مسیر حرکت هر یک از قطرات به صورت واضح قابل تشخیص است و زاویه پاشش به مقدار طراحی می‌رسد (شکل ۴-۶).

موفق روی موتورهای سوخت گازی پی‌گیری کردند تا در نهایت موتوری با پیشرانش ۴۴۴۸ نیوتن را آزمایش کردند و موتور گردابه‌ای راه، به‌عنوان نامزد نسل دوم وسائل پرتاب‌شونده‌ای که قابل استفاده مجدد هستند، پیشنهاد نمودند [۷].

در مقالاتی که تاکنون ارائه شده است [۱۴-۱۵]، بیشتر مؤلفه‌های پیش‌رانه به‌صورت گازی در نظر گرفته شده‌اند و اشاره‌ای به مؤلفه‌های مایع نشده است. با توجه به نو بودن این نوع محفظه‌ها، روابط طراحی مشخصی برای آنها وجود ندارد و تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد محفظه نامشخص است. لذا با طراحی و ساخت تست‌رهای، فرایندهای درونی در این محفظه‌ها، شناسایی و تجزیه و تحلیل گردیدند. در پژوهش حاضر، انژکتورهای سامانه پاشش یک موتور آزمایشگاهی گردابه‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این ساختار از دو نوع انژکتور جریانی، گریز از مرکز و مماسی استفاده شده است و آثار پارامترهای هندسی آنها بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی (نحوه پاشش، دبی، افت فشار و زاویه پاشش) مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

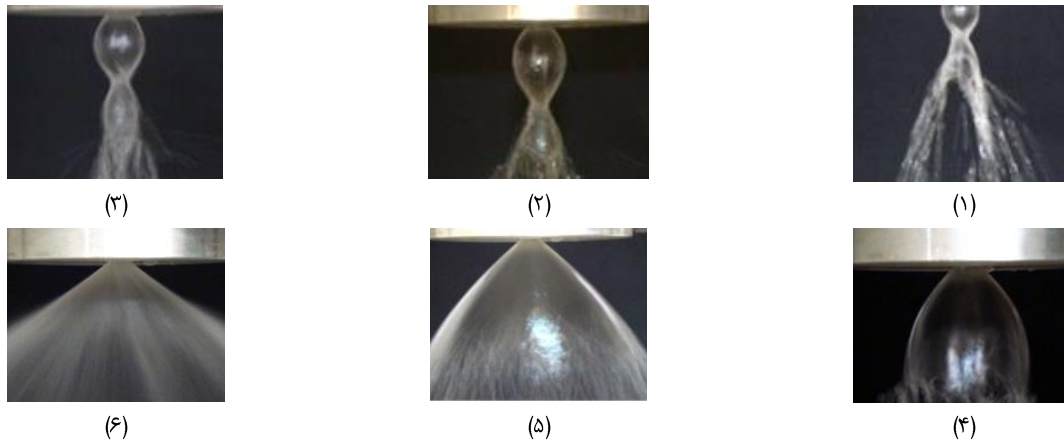
۲. انواع انژکتور در موتورهای سوخت مایع

به‌طور کلی انژکتورهای مورد استفاده در موتورهای سوخت مایع به دو دسته انژکتورهای گریز از مرکز و جریانی تقسیم می‌شوند. انژکتورهای گریز از مرکز نیز خود به دو دسته انژکتور ماریچ‌دار و سوراخ مماسی تقسیم می‌شوند [۱۰] (شکل ۲).



شکل ۲. تقسیم بندی کلی انژکتورها [۱۰]

در یک دسته‌بندی تکمیلی، انژکتورها می‌توانند به انژکتورهای تک‌پایه و دوپایه تقسیم شوند؛ انژکتورهای دوپایه نیز خود به انژکتورهای اختلاط داخلی و خارجی دسته‌بندی می‌شوند. نوع اختلاط داخلی برای پیش‌رانه‌های غیرخودمشتعل و نوع اختلاط خارجی برای پیش‌رانه‌های خودمشتعل به‌کار می‌روند [۱۰] (شکل ۳).



شکل ۴. پدیده فروپاشی و تشکیل زاویه پاشش در فشارهای مختلف [۱۶]

۴. مدل محفظه احتراق گردابه‌ای مورد استفاده

در کار تحقیقاتی حاضر که برای نخستین بار در کشور انجام شده است، یک محفظه با تراست ۱۰۰۰ نیوتن با زوج سوخت و اکسیدکننده کروسین و اکسیژن مایع و فشار محفظه یک مگاپاسکال طراحی شده است (جدول ۱). این زوج خودمشتعل نیستند، بنابراین برای احتراق نیاز به یک سیستم راه‌انداز دارند. برای راه‌اندازی اولیه این پیشرانه از سوخت تری‌اتیل آلومینیوم استفاده شده است. در این محفظه، ابتدا بخشی از اکسیژن مایع با تری‌اتیل آلومینیوم را یک انژکتور دوپایه گریز از مرکز وارد محفظه می‌کند و پس از این که اشتعال اولیه صورت گرفت، سوخت کروسین از ۸ انژکتور جریانی با زاویه ۱۵ درجه که دورتادور صفحه انژکتور چیده شده‌اند، وارد محفظه می‌شود و در این حالت سوخت تری‌اتیل آلومینیوم قطع و بخش دیگر اکسیژن مایع از ۶ انژکتور جریانی که به صورت مماسی در انتهای قسمت سیلندری محفظه چیده شده‌اند، به صورت گردابه‌ای وارد محفظه می‌شود (شکل ۵). بنابراین در محفظه احتراق گردابه‌ای از دو نوع انژکتور جریانی و گریز از مرکز مماسی استفاده شده که در مراحل بعد آزمون‌های تجربی جهت انتخاب نهایی آنها انجام شده است.

۵. محاسبات و طراحی انژکتور

مهم‌ترین مسئله در طراحی انژکتورها موضوع اتمیزه کردن و پاشش یکنواخت و مناسب آنهاست. به عبارتی باید به مواردی چون برد پاشش، همگونی پاشش، نازکی (قطر قطره) پاشش و زاویه پاشش دقت کرد. طراحی انژکتور به چند معیار اساسی وابسته است [۱۷]:

۱. تولیدی بودن طرح

۲. دادن ایمپالس بیشینه

۳. دادن توزیع مناسب نسبت مؤلفه‌ها در مقطع عرضی محفظه، این معیار از لحاظ پایدارتر بودن محفظه و احتراق مناسب سوخت و اکسیدکننده دارای اهمیت است

۴. دادن شدت نسبی مناسب

۵-۱. طراحی انژکتور سوخت

به دلیل پایین بودن دبی سوخت و لزوم به تعداد زیاد انژکتور، از انژکتورهای جریانی که به صورت زاویه‌دار در صفحه انژکتور قرار می‌گیرند استفاده شده است. قرارگیری زاویه‌دار انژکتور به این دلیل است که برخورد مناسب بین مؤلفه سوخت و اکسیدکننده به خوبی انجام و پاشش سوخت به هسته محفظه هدایت گردد. برای طراحی انژکتورها با توجه به شکل ۶ از رابطه ۱ استفاده می‌شود [۱۰].

$$F_C = \frac{\dot{m}}{\mu_{inj} \sqrt{2\Delta P \rho}} \Rightarrow d_c = \sqrt{4.F_C / \pi} \quad (1)$$

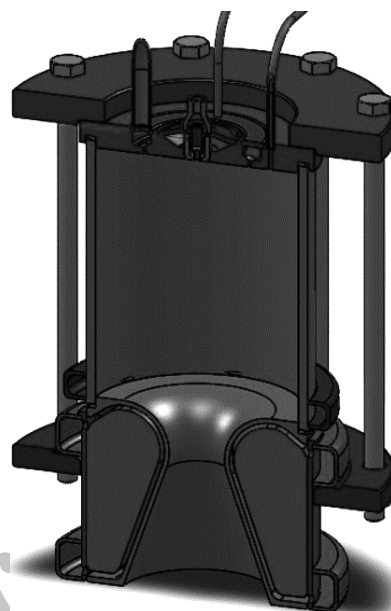
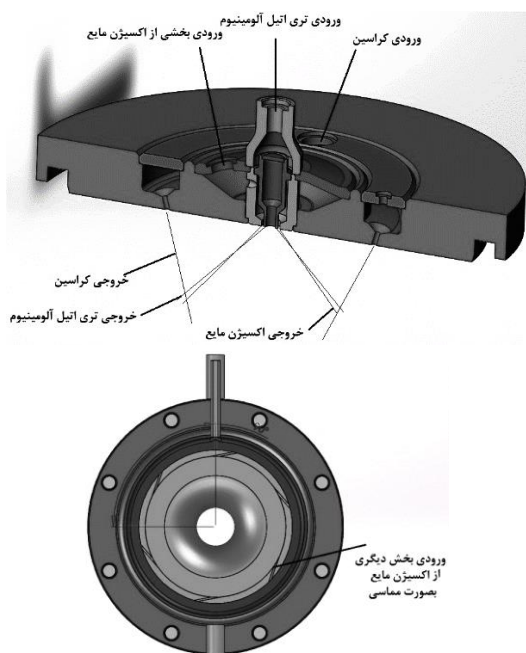
$$90^\circ \leq 2\phi \leq 120^\circ$$

$$\Delta P = 0.3 \text{ MPa}$$

به طوری که در این رابطه μ_{inj} ضریب عبوردهی انژکتور است که با توجه به شکل ۶ و تست‌های تجربی به دست می‌آید، ΔP افت فشار انژکتور، ρ جرم حجمی سیال، F_C سطح مقطع خروجی انژکتور، \dot{m} دبی عبوری از هر انژکتور که برابر دبی کل سوخت و یا اکسیدکننده تقسیم بر تعداد انژکتور، ϕ زاویه پخ ورودی که به دلیل کاهش افت و یکنواختی ورودی سیال استفاده می‌شود، می‌باشد. افت فشار زیاد در انژکتورهای جریانی از یک

مگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود [۱۰].

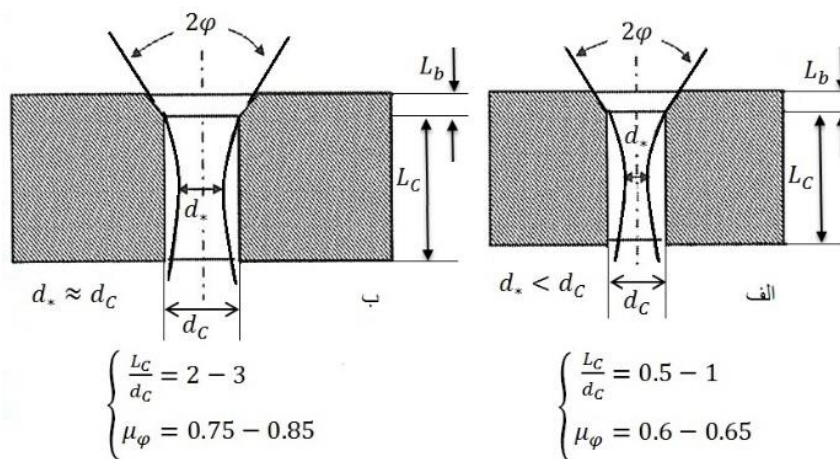
طرف سبب نازکی و از طرفی باعث افزایش برد پاشش می‌شود. معمولاً در موتورهای کمپیشنر مقدار این افت بین ۰/۳ تا ۰/۵



شکل ۵. نمایی از محفظه احتراق گردهای به همراه سامانه پاشش

جدول ۱. مشخصات محفظه احتراق گردهای

مقدار	واحد	مشخصه
کروسین	-	سوخت
اکسیژن مایع	-	اکسیدکننده
۱۰۰۰	نیوتن	نیروی پیشران
۱	مگاپاسکال	فشار محفظه احتراق
۱/۳	-	نسبت دبی اکسیدکننده به سوخت
۲۱۷/۵	گرم بر ثانیه	دبی سوخت
۱۱۳	گرم بر ثانیه	دبی اکسید محوری
۱۶۹	گرم بر ثانیه	دبی اکسید گردهای



شکل ۶. نمایی از انزکتورهای جریانی [۱۰]

ورودی و خروجی‌های مسئله برای طراحی انژکتور در جدول ۲ و نقشه مونتازی در شکل ۷ نمایش داده شده است.

۲-۵. طراحی انژکتور گریز از مرکز جریان محوری

انژکتور انتخاب شده برای طراحی در این پروژه، انژکتور گریز از مرکز دوپایه مماسی با اختلاط خارجی است. انژکتور میانی برای تزریق تری اتیل آلومینیوم و انژکتور پیرامونی جهت اکسیژن مایع استفاده می‌شود. انژکتور سوخت دارای ۲ گذرگاه ورودی و انژکتور اکسنده دارای ۳ گذرگاه برای وارد شدن سوخت و اکسنده به درون انژکتورها هستند. در طراحی انژکتور پیچشی پارامترهای متعددی دخیل است. این پارامترها شامل پارامترهای ورودی مسئله، انتخابی و خروجی می‌باشند. پارامترهای انتخابی توسط طراح اغلب براساس تجربه و توصیه‌های طراحی انتخاب می‌شود و پارامترهای خروجی براساس روابط تئوری، تجربی، نمودارها و پارامترهای انتخابی به دست می‌آیند. برای طراحی انژکتور با توجه به ورودی‌های مسئله (جدول ۳) و شکل ۸، مراحل زیر برای به دست آوردن دیگر پارامترهای هندسی انژکتور انجام می‌گیرد [۹]:

۱. با استفاده از گراف شکل ۹، با توجه به ورودی زاویه پاشش، مشخصه هندسی، ضریب دبی و ضریب سطح انژکتور به دست می‌آید.
مشخصه هندسی انژکتور:

$$A = \frac{R_c \cdot r_c}{n \cdot r_{in}^2} \quad (2)$$

ضریب دبی انژکتور:

$$\mu_{inj} = \frac{\dot{m}_{inj}}{\dot{m}_{injT}} < 1 \quad (3)$$

ضریب سطح انژکتور:

$$\varphi = \frac{F^*}{F_c} = \frac{\pi(r_c^2 - r_m^2)}{\pi r_c^2} = 1 - \frac{r_m^2}{r_c^2} < 1 \quad (4)$$

۲. با استفاده از رابطه زیر سطح دهانه خروجی و سپس شعاع نازل به دست می‌آید:

$$F_c = \frac{\dot{m}}{\mu_\varphi \sqrt{2\Delta p \cdot \rho}} \Rightarrow r_c = \sqrt{\frac{F_c}{\pi}} \quad (5)$$

۳. با داشتن مشخصه هندسی، شعاع نازل خروجی و تعداد ورودی‌ها، مقدار شعاع ورودی‌ها محاسبه می‌شود.

$$A = \frac{R_c \cdot r_c}{n \cdot r_{in}^2} \Rightarrow r_{in} = \sqrt{\frac{r_c \cdot R_c}{n \cdot A}} \quad (6)$$

۴. محاسبه مقدار طول ورودی:

$$\frac{l_{in}}{r_{in}} = 1.5 - 2.3 \quad (7)$$

۵. محاسبه قطر محفظه انژکتور:

$$R_k \approx R_z + r_{in} \quad (8)$$

۶. محاسبه ارتفاع نازل:

$$\frac{l_c}{d_c} = 0.25 - 1.0 \quad (9)$$

۷. تعیین مقدار زاویه شیب دهانه ورودی نازل:

$$2\psi = 60^\circ - 120^\circ \quad (10)$$

۸. محاسبه ارتفاع نازل:

$$h \approx D_k = 2R_k \quad (11)$$

برای انژکتور داخلی و خارجی با توجه به روابط، محاسبات انجام و نقشه مونتازی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

۳-۵. طراحی انژکتور مماسی جریان گردابه‌ای

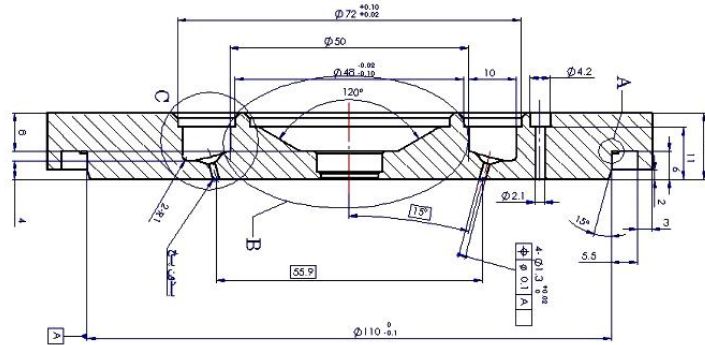
برای بررسی جریان گردابه‌ای و تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد محفظه، ابتدا یک محفظه از جنس پلکسی‌گلس - برای رؤیت جریان - که قابلیت‌هایی چون: سهولت تعویض، تغییر افت فشار و تغییر زاویه ورودی انژکتورها را داشته باشد، طراحی و ساخته شد. طراحی به گونه‌ای صورت گرفت که انژکتورها به راحتی قابل تعویض باشند و طول محفظه پلکسی‌گلس نیز بلند انتخاب شد تا امکان انجام آزمون در فشار و دبی‌های مختلف وجود داشته باشد. در آزمون‌ها از انژکتورهای مختلف با افت و زوایای متفاوت استفاده گردید. جهت ایجاد جریان گردابه‌ای لازم است که یک تکیه‌گاه زیر ورودی‌های سپال مماسی قرار گیرد (شکل ۱۱)؛ تا جریان به سمت بالا هدایت گردد. اگر این تکیه‌گاه وجود نداشته باشد، جریان به سمت بالا حرکت نخواهد کرد. مقدار ضخامت این تکیه‌گاه بر عملکرد جریان در محفظه احتراق تأثیر دارد [۱۸].
انژکتور مورد استفاده برای جریان گردابه‌ای، از نوع جریانی و مماس بر بدنه ایجاد می‌شود. تعداد و ضریب دبی این انژکتورها از تست‌های سرد انجام گرفته به دست آمد. نتایج تست‌ها نشان داد که هرچه تعداد انژکتورها بیشتر باشد، یکنواختی جریان بیشتر می‌شود و زاویه‌دار کردن سوراخ‌ها تا ۵ درجه روی بالارفتن جریان اثر چندانی ندارد. به همین دلیل از ۶ انژکتور به صورت مماس بر بدنه استفاده شد. در جدول ۴ اطلاعات مربوط به این انژکتور و در شکل ۱۲ نمایی از طرح نمایش داده شده است.

جدول ۲. پارامترهای انژکتور سوخت

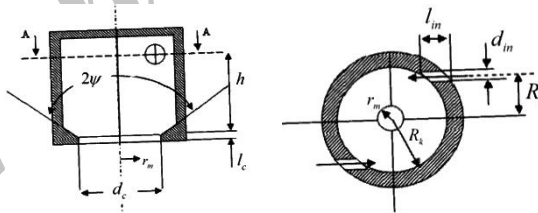
مقدار	واحد	پارامتر
۸	-	تعداد انژکتور
۰/۳	مگاپاسکال	افت فشار
۸۱۰	کیلوگرم بر متر مکعب	چگالی سوخت
۰/۸	-	ضریب دبی
۱۵	درجه	زاویه خروجی انژکتور
۴	میلی‌متر	طول انژکتور
۱/۳	میلی‌متر	قطر سوراخ انژکتور

جدول ۳. پارامترهای ورودی انژکتور گریز از مرکز

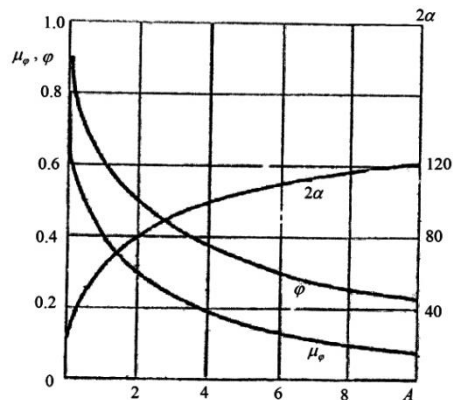
تعداد سوراخ‌های ورودی	زاویه پاشش (درجه)	دبی (کیلوگرم بر ثانیه)	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	ویسکوزیته (پاسکال ثانیه)	افت فشار (مگاپاسکال)	
۲	۱۰۰	۰/۰۲	۸۳۵	۰/۰۰۳۲۴	۱/۲	تری اتیل آلومینیوم
۳	۹۰	۱۱۰/۳	۱۱۴۰	۰/۰۰۰۱۹	۰/۳	اکسیژن مایع



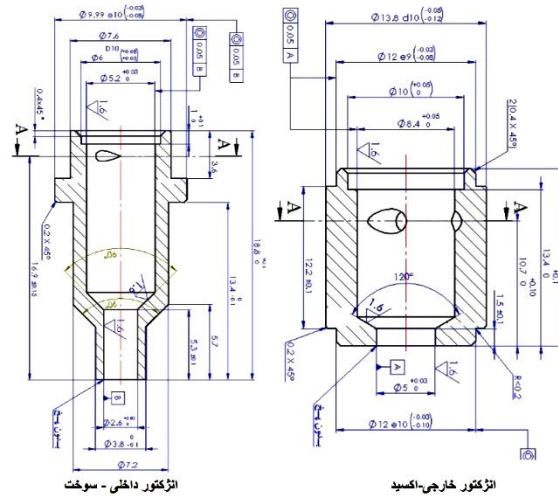
شکل ۷. نمایی از صفحه انژکتور با انژکتورهای جریان سوخت



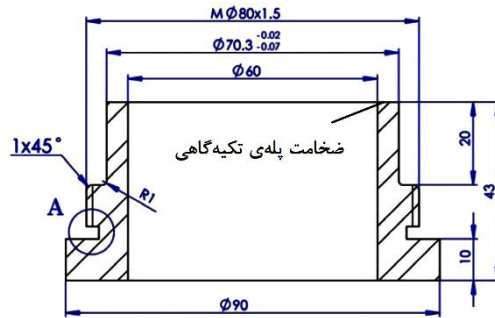
شکل ۸. پارامترهای هندسی انژکتور گریز از مرکز مماسی [۹]



شکل ۹. مشخصه هندسی انژکتور، ضریب دبی، ضریب سطح و زاویه متوسط چتر پاشش در انژکتور [۹]



شکل ۱۰. نمایی از انژکتور سوخت و اکسید محوری



شکل ۱۱. نمایی از پله تکیه‌گاهی [۱۸]

جدول ۴. پارامترهای انژکتور گردابه‌ای اکسید

مقدار	واحد	پارامتر
۶	-	تعداد انژکتور
۰/۳	مگاپاسکال	افت فشار
۱۱۴۰	کیلوگرم بر متر مکعب	چگالی اکسید
۰/۵۷	-	ضریب دبی
صفر	درجه	زاویه خروجی انژکتور
۵	میلی‌متر	طول انژکتور
۱/۵	میلی‌متر	قطر سوراخ انژکتور

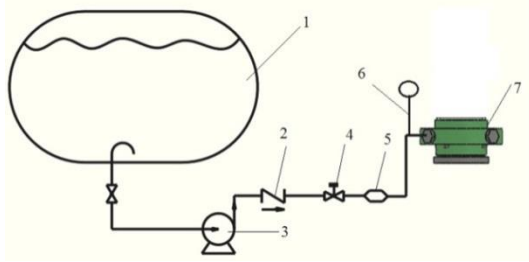
محفظه ایجاد شدند. در شکل ۱۳ نمونه ساختی انژکتور و صفحه انژکتور نمایش داده شده است.

۷. آزمون انژکتورها با سیال عامل آب

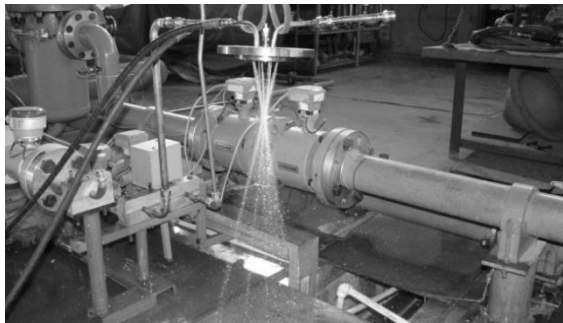
برای آزمون انژکتورها از سیال عامل آب استفاده می‌شود. جهت انجام این تست‌ها باید دبی آب معادل مؤلفه‌های سوخت و اکسیدکننده معلوم باشد. با استفاده از رابطه ۱۲ در فشار کاری

۶. ساخت انژکتور و صفحه انژکتور

پس از به‌دست آوردن مقادیر لازم جهت ساخت انژکتور و تهیه نقشه ساختی، نسبت به ساخت سامانه اقدام شد. در مورد انژکتورهای گریز از مرکز، ابتدا توسط دستگاه تراش ابعاد هندسی انژکتور تولید و سپس سوراخ‌های مماسی آن ایجاد شد. انژکتورهای جریانی مربوط به سوخت روی صفحه انژکتور و انژکتور جریانی گردابه‌ای به‌صورت مماسی روی بدنه استوانه‌ای



شکل ۱۴. نمایی از مدار تست؛ (۱) مخزن آب، (۲) شیر یکطرفه، (۳) پمپ، (۴) شیر قطع و وصل جریان، (۵) دبی سنج، (۶) فشارسنج، (۷) صفحه انژکتور



شکل ۱۵. تصویری از استند تست

۷-۲. تست‌های انژکتور گریز از مرکز مماسی

۷-۲-۱. تست پاشش و اندازه‌گیری زاویه پاشش

در انجام فرایند تست سرد انژکتور برای هر کدام از انژکتورها، فشار از ۱ بار به تدریج تا فشار محاسباتی افزایش پیدا کرد. در روند این افزایش فشار، رژیم‌های متوالی فروپاشی جریان ایجاد گردید و شکل جریان خروجی از انژکتور - به ترتیب مطابق شکل ۱۶ - از زاویه پاشش کم تا زاویه پاشش محاسباتی تغییر نمود. تغییر رفتار فروپاشی جریان همان‌گونه است که پیش از این در بخش ۳ اشاره شد. در شکل ۱۷، روش اندازه‌گیری تصویری زاویه پاشش هر انژکتور از آزمون‌ها ارائه شده است. در فرایند انجام تست‌ها، مقدار دبی و فشار عبوری از هر انژکتور ثبت گردید (جدول ۷).

۷-۲-۲. تست توزیع قطر قطرات

برای به دست آوردن توزیع قطر قطرات از دستگاه لیزری PDA استفاده شده است. در این تست، نقاط اندازه‌گیری روی یک صفحه عمود بر محور انژکتور در فاصله ۳۰ میلی‌متری از اریفیس خروجی آن قرار گرفته‌اند. شبکه مورد نظر برای اندازه‌گیری، یک شبکه دایروی است که در حدود ۱۰۰ نقطه اندازه‌گیری روی آن واقع شده است. نمونه این شبکه در شکل ۱۸ نمایش داده شده است. پارامترهای فیزیکی مورد تست و قطر قطرات برای

مورد نظر این محاسبات انجام شد که در جدول ۵ خلاصه شده است.

$$\frac{\dot{m}_{w-p}}{\dot{m}_p} = \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_p}} \quad (12)$$

۷-۱. تست انژکتور جریانی سوخت

پس از ساخت صفحه انژکتور، مدار تستی به صورت شکل ۱۴ ایجاد گردید. این مدار شامل مخزن آب، شیر یکطرفه، پمپ، شیر قطع و وصل جریان، دبی‌سنج و فشارسنج می‌باشد. شکل ۱۵ تصویری از تستر اجرا شده برای صفحه انژکتور را نشان می‌دهد. در این آزمون علاوه بر آنکه برخورد جت خروجی انژکتورها در یک نقطه مورد بررسی قرار گرفت، دبی و فشار نیز اندازه‌گیری شد. در جدول ۶ مقادیر اندازه‌گیری آورده شده است.



شکل ۱۲. نمایی از انژکتور گردابه‌ای اکسید [۱۸]



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۳. انژکتورهای مورد استفاده؛ الف) انژکتور خارجی گریز از مرکز، ب) انژکتور داخلی گریز از مرکز، ج) صفحه انژکتور سوخت، د) محفظه با انژکتور مماسی برای جریان گردابه‌ای

حالت‌های ذکر شده در جدول ۸ ذکر شده است. در شکل ۱۹ توزیع قطر میانگین قطرات برای مؤلفه داخلی و در شکل ۲۰ برای مؤلفه خارجی، روی قطر صفحه مش‌بندی شده نشان داده شده است. در این انژکتورها، قطرات با بیشترین قطر در اطراف یال چتر پاشش متمرکز هستند. دلیل این پدیده همان حرکت هوای اطراف از خارج به داخل چتر پاشش است که در نتیجه قطرات ریزتر را با

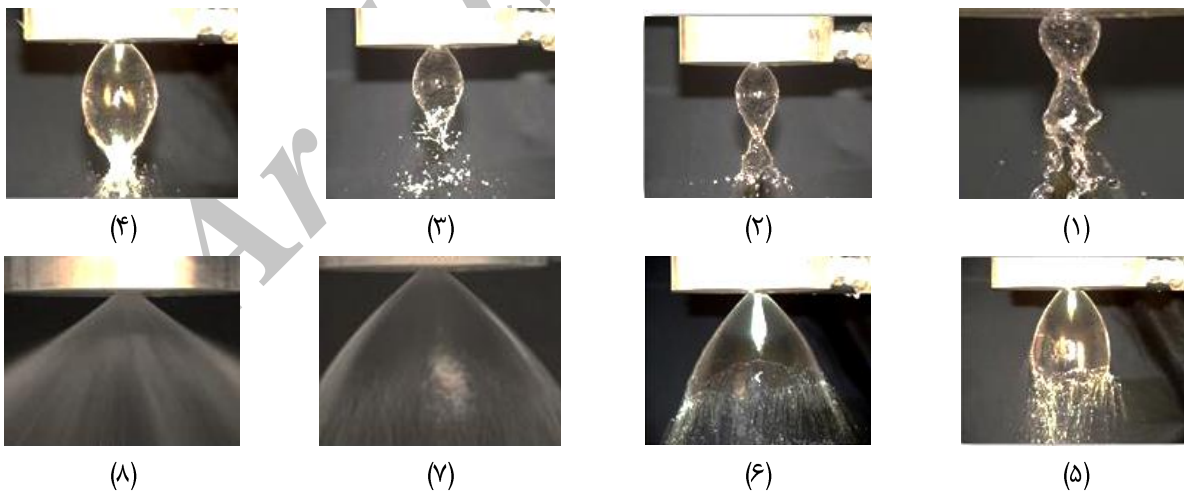
خود به مرکز مخروط پاشش حمل می‌کند. با افزایش فشار و در نتیجه افزایش سرعت قطرات، اولاً نیروی ایرودینامیکی وارد بر مایع که سبب تبدیل آن به قطرات می‌شود، شدیدتر شده و در نتیجه قطرات ریزتری حاصل می‌شوند. ثانیاً هوا، که با شدت بیشتری به داخل چتر پاشش کشیده می‌شوند، قطرات ریزتری را با خود به ناحیه میانی می‌آورد.

جدول ۵. مقدار دبی آب معادل سوخت و اکسیدکننده

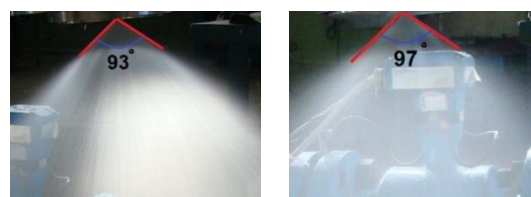
نوع انژکتور	دبی واقعی (کیلوگرم بر ثانیه)	چگالی مولفه (کیلوگرم بر متر مکعب)	دبی آب معادل (کیلوگرم بر ثانیه)	افت فشار کاری (مگاپاسکال)
انژکتور جریان سوخت اصلی	۰/۲۱۷۵	۸۱۰	۰/۲۴۱۵	۰/۳
انژکتور مماسی سوخت راه‌انداز	۰/۰۲	۸۳۵	۰/۰۲۴	۱/۲
انژکتور مماسی اکسید محوری	۰/۱۱۳	۱۱۴۰	۰/۱۰۶	۰/۳
انژکتور جریان مماسی اکسید گردابه‌ای	۰/۱۶۹	۱۱۴۰	۰/۱۵۸	۰/۳

جدول ۶. مقدار دبی انژکتور جریان سوخت در فشارهای مختلف

شماره تست	فشار ورودی (مگاپاسکال)	فشار پشت صفحه انژکتور (مگاپاسکال)	دبی (کیلوگرم بر ثانیه)
۱	۰/۲	۰/۱۸۸	۰/۱۹۳
۲	۰/۳	۰/۲۸۸	۰/۲۲۷
۳	۰/۴	۰/۳۸۹	۰/۲۶
۴	۰/۵	۰/۴۸۵	۰/۲۹۱



شکل ۱۶. مراحل تشکیل زاویه پاشش در فشارهای مختلف



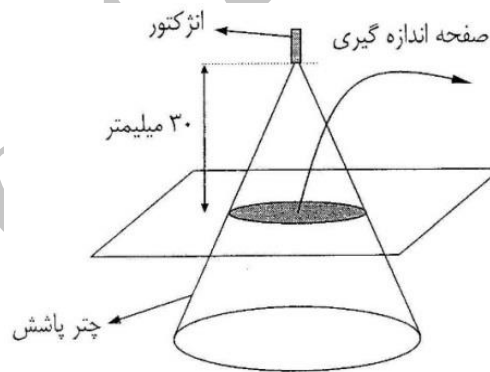
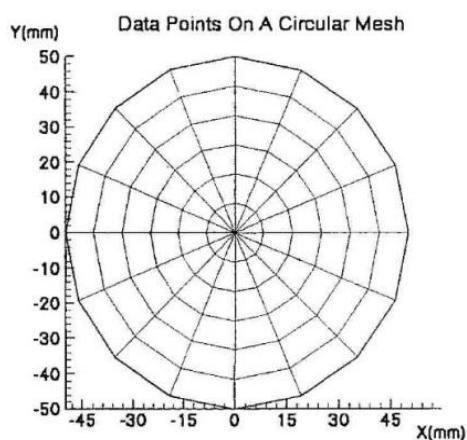
شکل ۱۷. زاویه پاشش انژکتور داخلی و خارجی

جدول ۷. مقدار دبی انژکتور گریزاز مرکز در فشارهای مختلف

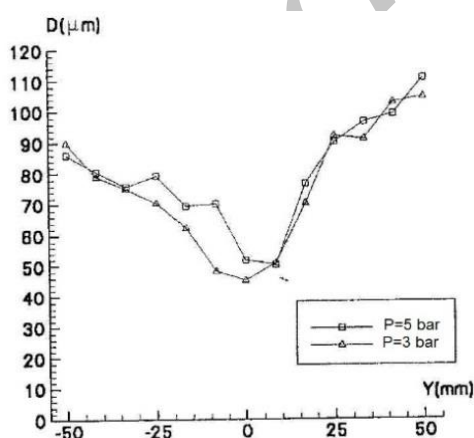
شماره تست	انژکتور خارجی		انژکتور خارجی	
	دبی کیلوگرم بر ثانیه	فشار ورودی مگاپاسکال	دبی کیلوگرم بر ثانیه	فشار ورودی مگاپاسکال
۱	۰/۰۲۱	۰/۹	۰/۸۸	۰/۲
۲	۰/۰۲۲	۰/۱۰	۰/۱۱۲	۰/۳
۳	۰/۰۲۳	۰/۱۱	۰/۱۳۰	۰/۴
۴	۰/۰۲۴	۰/۱۲	۰/۱۴۷	۰/۵

جدول ۸. ماتریس تست در مقطع ۳۰ میلی متری از چتر پاشش

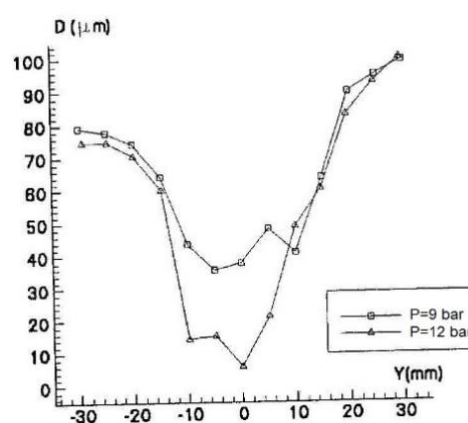
ابعاد صفحه مش بندی شده	فشار تست	مؤلفه‌های مورد تست
دایره‌ای به شعاع ۳۰ میلی متر	۹ بار	مؤلفه داخلی
دایره‌ای به شعاع ۵۰ میلی متر	۵ بار	مؤلفه خارجی
دایره‌ای به شعاع ۵۰ میلی متر	۳ بار خارجی	دو پایه



شکل ۱۸. صفحه اندازه گیری و نقاط داده برداری



شکل ۲۰. توزیع قطر قطرات روی یک قطر از چتر برای مؤلفه خارجی



شکل ۱۹. توزیع قطر قطرات روی یک قطر از چتر برای مؤلفه داخلی

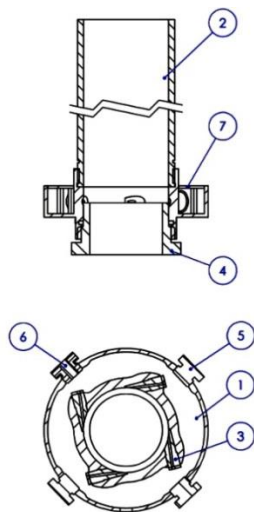
برخورد کرده و عملاً چتر پاشش واحدی به وجود می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود قطر قطرات در حالتی که دو مؤلفه با هم پاشیده می‌شوند، بیشتر از حالت تک تک مؤلفه‌هاست.

توزیع قطر میانگین مربوط به انژکتور دو پایه در فشار نامی مؤلفه‌ها در شکل ۲۱ نمایش داده شده است. در این فشارها چتر پاشش هر دو مؤلفه با هم در فاصله کمی از اریفیس خروجی

۳-۷. تست انژکتور جریانی مماسی گردابه‌ای

برای بررسی جریان گردابه‌ای و تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد محفظه، استوانه‌ای از جنس پلکسی‌گلس با دو قطر متفاوت با مشخصات ذکر شده در جدول ۹ طراحی و ساخته شد. در ابتدا با دبی مشخص، چهار انژکتور با قطر ۱/۷ میلی‌متر برای محفظه با قطر ۷۰ میلی‌متر و ۴ و ۶ انژکتور با قطر ۱/۷ و ۱/۵ میلی‌متر برای محفظه ۱۱۰ میلی‌متری به‌عنوان انژکتورهای جریان گردابه‌ای به‌کار گرفته شدند. طراحی به‌گونه‌ای صورت گرفت که انژکتورها به‌راحتی قابل تعویض باشند و در تست‌های تعریف‌شده از انژکتورهای مختلف با افت و زوایای متفاوت استفاده گردید. در شکل ۲۲ نمایی از طرح و در شکل ۲۳ مجموعه اصلی و بعضی از المان‌های محفظه ساخته‌شده آورده شده است. تست‌ها با دو محفظه با قطر ۷۰ و ۱۱۰ میلی‌متر در افت‌ها، تعداد و زوایای مختلف انژکتور و ضخامت پله تکیه‌گاهی متفاوت انجام شد. برای نمونه، در جدول ۱۰ نتایج تست - که برای محفظه ۷۰ و ۱۱۰ میلی‌متری با زاویه صفر و ۵ درجه ورودی انژکتور و ضخامت پله تکیه‌گاهی ۱۵ میلی‌متر در فشارهای مختلف انجام گرفته - آورده شده است.

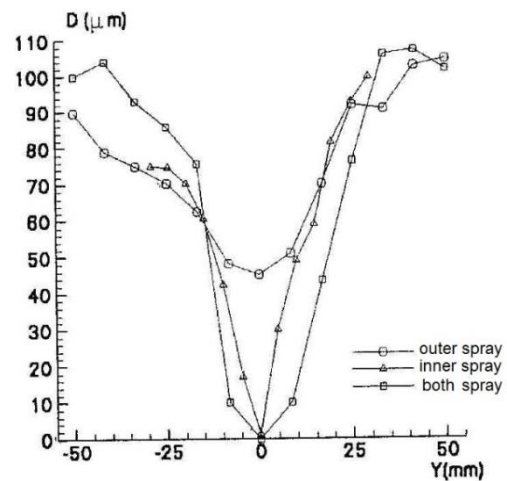
ساختی و مقدار ضریب دبی انتخابی می‌باشد. خطای به‌وجود آمده در انژکتور گریز از مرکز که در حدود ۵/۶ درصد در دبی و ۳ درصد در زاویه‌ی پاشش است، می‌تواند ناشی از تلرانس‌های ساختی و فرضیات و ضرایب انتخابی در طراحی انژکتور باشد. از تست انژکتور جریانی مماسی جریان گردابه‌ای نتیجه گرفته شد که هرچه تعداد انژکتورها بیش‌تر باشد، یکنواختی جریان بیشتر است (شکل ۲۴). همچنین زاویه‌دار کردن انژکتور تا ۵ درجه بدون استفاده از پله تکیه‌گاهی اثر چندانی روی دبی و بالا رفتن جریان در محفظه ندارد؛ به‌همین دلیل در طراحی محفظه احتراق گردابه‌ای اصلی از محفظه‌ای با قطر ۱۱۰ میلی‌متر و تعداد ۶ انژکتور با قطر ۱/۵ میلی‌متر به‌صورت مماسی استفاده شد.



شکل ۲۲. نمایی از طرح محفظه به‌منظور تست سرد، (۷) کالکتور سیال، (۲) محفظه پلکسی‌گلس، (۳) انژکتور مماسی، (۴) پله تکیه‌گاهی، (۵) منفذ ورودی جهت تعویض انژکتورها، (۶) ورودی سیال



شکل ۲۳. تصاویری از مجموعه محفظه ساخته‌شده به‌همراه قطعات آن



شکل ۲۱. توزیع قطر قطرات انژکتور دوپایه

و تک‌تک مؤلفه‌های آن روی یک قطر از چتر پاشش

۴-۷. نتایج و تحلیل تست‌ها

در جدول ۱۱ مقادیر محاسباتی و مقادیر حاصل از تست و درصد خطای به دست‌آمده برای هر انژکتور به تفکیک آورده شده است. در انژکتور جریانی سوخت، با توجه به تست، جت جریان انژکتورها در یک نقطه با هم تلاقی پیدا می‌کنند و درصد خطای حدود ۴ درصد در مقدار دبی در فشار مورد نظر خطای ناشی از تلرانس‌های

گردابه‌ای این تأثیر دوچندان است و با چیدمان و انتخاب بهینه افت فشار و زاویه ورودی انژکتورها می‌توان به پارامترهای احتراقی مطابق با طراحی دست یافت. آزمون‌های انجام‌شده روی سامانه پاشش محفظه احتراق گردابه‌ای نشان داد که در انژکتور جریانی سوخت، جت انژکتورها در یک نقطه با هم تلاقی می‌کنند و در حدود ۴ درصد خطا در مقدار دبی در فشار مورد نظر وجود دارد. در انژکتور دو پایه گریز از مرکز؛ برای انژکتور داخلی تقریباً خطا در دبی وجود ندارد و در حدود ۳ درصد خطا در زاویه پاشش دیده می‌شود. برای انژکتور بیرونی نیز در حدود ۵/۶ درصد خطا در دبی و ۳ درصد خطا در زاویه پاشش ایجاد شده است. از تست انژکتور جریانی مماسی جریان گردابه‌ای نتیجه گرفته شد که؛ هرچه تعداد انژکتورها بیشتر باشد، یکنواختی جریان بیشتر است و همچنین زاویه‌دار کردن انژکتور تا ۵ درجه بدون استفاده از پله تکیه‌گاهی اثر چندانی روی دبی و بالا رفتن جریان در محفظه ندارد. بدین ترتیب محدوده مناسب عملکردی تمامی انژکتورهای مورد استفاده در یک محفظه احتراق گردابه‌ای مشخص شد.

۷-۵. بازه‌های مناسب طراحی مبتنی بر نتایج تست‌ها

از تست انژکتور مماسی جریان گردابه‌ای نتیجه گرفته شد که هرچه تعداد انژکتورها بیشتر باشد، یکنواختی جریان بیشتر است و زاویه‌دار کردن انژکتور تا ۵ درجه بدون استفاده از پله تکیه‌گاهی اثر چندانی بر دبی و بالا رفتن جریان در محفظه ندارد. در مورد انژکتور گریز از مرکز نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع مجرای انژکتور، نسبت طول به قطر نازل بزرگتر از یک و نسبت طول به قطر سوراخ ورودی کمتر از ۱/۵ زاویه پاشش کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش تعداد سوراخ‌های ورودی یکنواختی پاشش انژکتور از بین می‌رود. در مورد انژکتور جریانی، بازه‌های توصیه‌شده در ارتباط با انتخاب ضریب عبوردهی مناسب می‌باشد و در چینش انژکتورهای جریانی نیز بیان شد که استقرار انژکتورها باید طوری باشد که برخورد جریان‌ها در داخل گردابه داخلی صورت گیرد.

۸. نتیجه‌گیری

انژکتورها و صفحه انژکتور از المان‌های اصلی و تأثیرگذار بر فرایند احتراق در موتورهای سوخت مایع هستند. در محفظه احتراق



شکل ۲۴. تأثیر تعداد انژکتورهای مماسی بر یکنواختی جریان گردابه‌ای در محفظه

جدول ۹. مشخصات محفظه‌های ساخته شده

طول محفظه (میلی‌متر)	ضخامت پله‌ی تکیه‌گاهی (میلی‌متر)	زاویه انژکتور (درجه)	قطر انژکتور (میلی‌متر)	تعداد انژکتور -	قطر محفظه (میلی‌متر)
۴۰۰	صفر، ۲، ۵، ۱۰، ۱۵	صفر	۱/۷	۴	۷۰
۴۰۰	صفر، ۲، ۵، ۱۰، ۱۵	صفر، ۵	۱/۷	۴	۱۱۰
۴۰۰	صفر، ۲، ۵، ۱۰، ۱۵	صفر، ۵	۱/۵	۶	۱۱۰

جدول ۱۰. پارامترهای اندازه‌گیری شده برای محفظه با قطر ۷۰ و ۱۱۰ میلی‌متر

ردیف	قطر محفظه (میلی‌متر)	فشار ورودی (بار)	قطر انژکتور (میلی‌متر)	زاویه انژکتور (درجه)	دبی (گرم بر ثانیه)
۱	۷۰	۲	۱/۷	صفر	۹۹
۲	۷۰	۳/۱۱	۱/۷	صفر	۱۲۷
۳	۷۰	۴/۱۴	۱/۷	صفر	۱۴۹
۴	۷۰	۴/۹۷	۱/۷	صفر	۱۶۵
۵	۱۱۰	۲/۰۲	۱/۵	صفر	۱۱۸
۶	۱۱۰	۳/۰۳	۱/۵	صفر	۱۴۹
۷	۱۱۰	۴	۱/۵	صفر	۱۷۵
۸	۱۱۰	۵/۰۲	۱/۵	صفر	۱۹۴
۹	۱۱۰	۲/۰۷	۱/۵	۵	۱۱۹
۱۰	۱۱۰	۳/۰۵	۱/۵	۵	۱۵۱
۱۱	۱۱۰	۴/۰۱	۱/۵	۵	۱۷۸
۱۲	۱۱۰	۵/۰۳	۱/۵	۵	۱۹۷

جدول ۱۱. مقادیر محاسباتی و مقادیر حاصل از تست و درصد خطای به‌دست‌آمده برای هر انژکتور

نوع انژکتور	فشار کاری (مگاپاسکال)	دبی محاسباتی (کیلوگرم بر ثانیه)	دبی حاصل از تست (کیلوگرم بر ثانیه)	زاویه پاشش (درجه)	درصد خطای دبی	درصد خطای زاویه پاشش
انژکتور جریان‌ی سوخت اصلی	۰/۳	۰/۲۴۱۵	۰/۲۳۱۵	۱۵	۴٪	-
انژکتور مماسی سوخت راه‌انداز	۱/۲	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴	۱۰۰	صفر	۳
انژکتور مماسی اکسید محوری	۰/۳	۰/۱۰۶	۰/۱۱۲	۹۰	۵/۶٪	۳
انژکتور جریان‌ی مماسی اکسید گردابه‌ای	۰/۳	۰/۱۵۸	۰/۱۴۹	صفر	۵/۷٪	-

۹. مأخذ

- [1] Y.H Zahao, M.H Hou, J.S Chin, Drop Size Distribution from Swirl and Air-blast Atomizer, *Atomization and Spray Technology*, Vol. 17, pp. 3-15, 1986.
- [2] D.H. Taylor, B.E. Walshm, Combustion Processes in a Medium Diesel Enggin, *The Inst. Eng*, Vol. 202, pp. 67-76, 1986.
- [3] D. Sivakumar, B.N.R., Role of geometric parameteres on the drop size characterisitcs of liquid-liquid coaxial swirl atomizers, *Atomization and Spray Technology*, Vol. 14, pp. 547-563, 1998.
- [4] A. Karegar, *Layout optimization model of injectors in injector page by using cold test results*, Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2006. (in Persian فارسی)
- [5] A.J. Yule, R.A. Shen, J.R. Jeong, G.G Nasr, D.D. James, The Performance Characteristics of Solid – Cone – Spray Pressure–Swirl Atomizers و *Atomization and sprays*, Vol. 10, pp. 627-646, 1990.
- [6] R. D. Rietz, F. V Bracco, *Mechanisms of breakup of Round liquid Jes*, The Encyclopedia of Fluid Mechanics, Chermisnof N., Gulf Publishing, Houston, Texas, Vol.3, chap. 10, pp. 233-249, 1986.
- [7] H.I, Makkarti, S.C. Molvi, *Science and Engineering of Droplets: Fundamentals and Application*, William Andrew Publishing, chap. 5, pp.121-137, 2000.

- [8] R. W. Tate, Spray patteration, *Ind. Eng. Chem*, Vol. 52, No.10, pp. 49-52, 1960.
- [9] V.M Kodryatcev, V.A. Kuznetsov, *Fundamental of theory and calculation of liquid propulsion rockets*, Moscow chap. 6, pp. 78-95, 1993.
- [10]. F. Ommi, *Engine and spacecraft propulsion*, Tehran, Besat Publishers, chap 5, pp. 47-80, 2010. (in Persian فارسی)
- [11] E. Valizadeh, M.J. Montazeri, M.R. Eshkevari and M. Dadkhah, Scenario of mass & energy parametrs optimization of specific liquid propellant engine and hot test, *The Eighth Annual Conference of the Association of Aerospace*, Malek Ashtar University, 2009. (in Persian فارسی)
- [12] A. Saghari, *Study of vortex combustion chamber performance in Missile and space propulsion systems*, Master's thesis, Malek Ashtar University, 2010. (in Persian فارسی)
- [13] M. J. verini, M.J. Malecki, J.A. Sauer, W. H. Knuth, Vortex Combustion Chamber Development for Future Liquid Rocket Engine Applications, *AIAA Paper* 2149, 2002.
- [14] L. Gongnan, Design and simulation of gas oxygen/ methane vortex cooling thrust chamber, *The 64th International Astronautical Congress, Beijing, China*, 2013.
- [15] J. Martin Chiaverini, J. Majdalani, Vortex Thrust Chamber Testing and Analysis for O2-H2 Propulsion Applications, *The 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Huntsville, Alabama*, July 2003.
- [16] K. Ramamurthi, Journalof, Experimental study of liquid sheets formed in coaxial swirl injectors, *Propulsion and Power*, Vol. 14, pp. 1103-1109, 1995.
- [17]. S.A. Esfehiani, *Proposing a Model to design of a bipropellant atomizer and its experimental testing*, Master's thesis, Malek Ashtar University, 2012. (in Persian فارسی)
- [18]. E. Valizadeh, S. M. Mousavi Naenian, M. M. Heydari, H. Saadati, Numerical analysis of the flow in vortex combustion chamber simulator cylinder of liquid propellant engines and its experimental test, *Modares Mechanical Engineering Journal*, Vol. 15, No. 9, pp. 313-321, 2014. (in Persian فارسی)

پی نوشت

1. Orbitech (Orbital technology Company)