# بررسی سیستم‌های پاشش در موتور اسکرمجت

**هادی اردستانی[۱]، فتح اله امی[۲]**

۱- دانشجوی دکتری هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، hadi.ardestani@modares.ac.ir

۲- استاد گروه هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، fommi@modares.ac.ir

**۱- چکیده**

در شرایط پرواز ماورای صوت، اسکرمجت‌ها وسیله‌های با بیشترین پیشرانش هوا تنفسی محسوب می شوند و محفظه احتراق آنها بخش اساسی آنها می باشد. برای حل مسائل مربوط به تولید تراست در یک زمان گذرای کوتاه(در حد میلی ثانیه) محفظه احتراق‌های سوپرسونیک نیازمند پایداری شعله کافی هستند. که این شامل اختلاط سریع، آغازش استوار و احتراق پایدار است. از آنجا که پایداری یک شعله در یک محفظه احتراق فراصوت، با توجه به شرایط پیچیده جریان، مسأله‌ای چالش برانگیز است، پاشش موثر سوخت به‌عنوان نگهدارنده شعله، ضروری است. سه نوع سیستم پاشش سوخت موجود است که هر کدام مزایا و معایب خود را دارد. وقتی سوخت به محفظه احتراق پاشش می شود، اولین مرحله اختلاط سوخت و هوا می‌باشد. این کار را می‌توان توسط فرایند پخش انجام داد و یا از مکانیزم نفوذ به وسیله پایه و یا به وسیله پاشش با مومنتوم مناسب در یک زاویه در دیواره محفظه احتراق ایجاد نمود. در همه سیستم‌های فوق، سوخت به صورت صوتی یا فراصوتی وارد جریان آزاد می‌شود. پاشش دیواره را می‌توان از نوع فرایند کاملاً دیفیوژنی، پاشش درگاه کاملاً نفوذی و پاشش مرکزی، تلفیقی از هر دو این فرایند در نظر گرفت. در این پژوهش سعی شده است مروری اجمالی بر روش‌های پاشش سوخت به محفظه احتراق موتور اسکرمجت انجام شود. این بررسی مبتنی بر تحقیقات نظری و تجربی انجام شده می‌باشد.

***واژه های کلیدی:*** *اسکرمجت، پاشش، اختلاط، نفوذ، پخش*

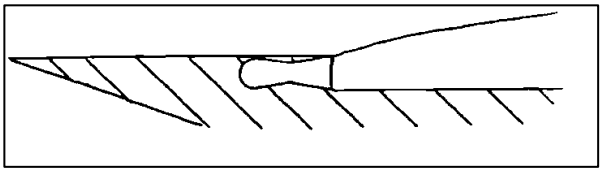
**۲- مقدمه**

برای توسعه یک محفظه احتراق کارآمد، ابزارهای مناسب برای انتقال سوخت لازم است. سه نوع سیستم پاشش سوخت موجود است که هر کدام مزایا و معایب خود را دارد. وقتی سوخت به محفظه احتراق پاشش می شود، اولین مرحله اختلاط سوخت و هوا می‌باشد. این کار را می‌توان توسط فرایند دیفیوژن (step/slot in combustor) انجام داد و یا از مکانیزم نفوذ(penetration) به وسیله پایه (Strut) و یا به وسیله پاشش با مومنتوم مناسب در یک زاویه در دیواره محفظه احتراق ایجاد نمود. اگر از فرایند دیفیوژن استفاده شود، به طور کلی طول محفظه احتراق بلند می‌شود که در اینصورت هدر رفت ناشی از اصطکاک سطح محفظه احتراق، چشمگیر خواهد بود. در مقابل، استفاده از مکانیزم نفوذ، در مجموع منجر به کوچک شدن محفظه احتراق می‌شود اما موج شوک به‌وجود آمده ناشی از مکانیزم نفوذ و به تبع آن هدر رفت یا افت فشار ناشی از این امواج شاک، بسیار مهم می‌باشد. بنابراین در هر دو سیستم افت فشار وجود دارد. سه نوع سیستم پاشش در موتورهای اسکرمجت موجود است که عبارتند از:

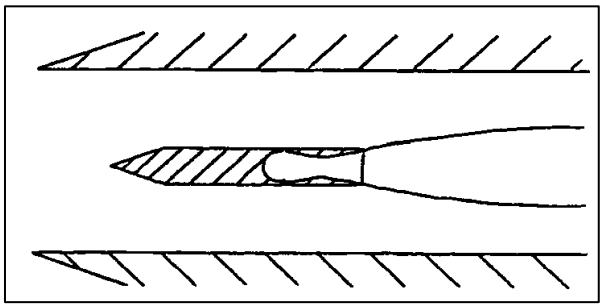
۱- پاشش دیواره(wall Injection): در این سیستم، از یک پله در پایین دست جریان در دیواره محفظه احتراق، پاشش انجام می‌شود.

۲- پاشش مرکزی(Central Injection): از یک پایه در مرکز محفظه احتراق، به پایین دست جریان پاشش انجام می‌شود.

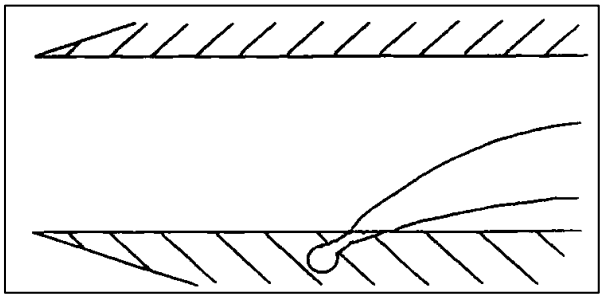
۳- پاشش درگاه(Port Injection): پاشش از یک درگاه یا درگاه‌هایی که در دیواره محفظه احتراق تعبیه شده، انجام می‌شود.



شکل ۱ پاشش دیواره



شکل ۲پاشش مرکزی



شکل ۳ پاشش درگاهی

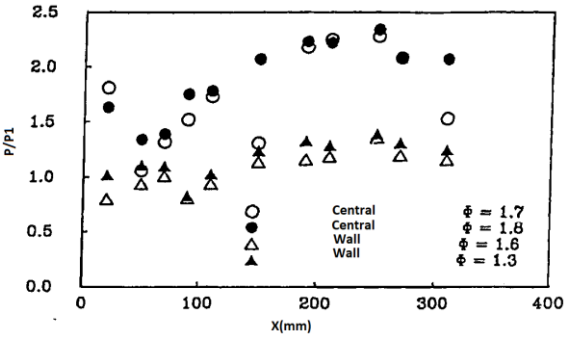
در همه سیستم‌های فوق، سوخت به صورت صوتی یا فراصوتی وارد جریان آزاد می‌شود. پاشش دیواره را می‌توان از نوع فرایند کاملاً دیفیوژنی، پاشش درگاه کاملاً نفوذی و پاشش مرکزی، تلفیقی از هر دو این فرایند در نظر گرفت[۱].

**۳- پاشش دیواره**

برخی مزایای پاشش دیواره به شرح زیر می‌باشد:

۱- این نوع پاشش یک لایه خنک کننده نازک برای دیواره محفظه احتراق فراهم می‌آورد.
۲- افت فشار جریان آزاد کاهش می‌یابد.
۳- هیچ پایه مرکزی و در نتیجه چالش خنک کاری آن نیز وجود ندارد.

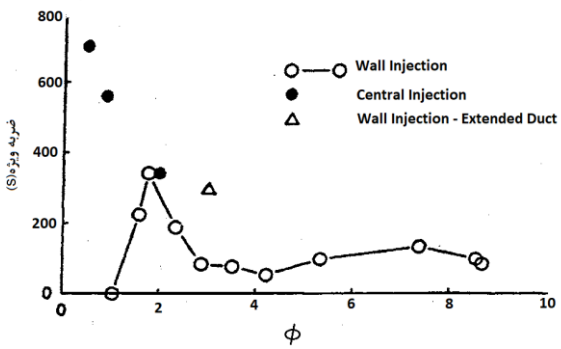
در آزمایش‌های موتور اسکرمجت که توسط تجهیزات هایپرسونیک ایمپالس، انجام می‌شود، خنک کاری محفظه احتراق مطرح نیست. بنابراین مزیت ۱ و ۳ فقط برای موتورهای عملی کاربرد دارد. اما مزیت دوم، افت فشار تولید شده توسط انژکتور قابل ملاحظه است چرا که همانطور که قبلاً اشاره شد، تراست به‌وجود آمده از طریق پاشش سوخت، بخشی از تراست کلی است و اگر به قیمت افت فشار زیاد در جریان آزاد شود، این مزیت از بین می رود. عیب دیگر سیستم پاشش دیواره این است که سوخت‌هایی مثل هیدروژن به سادگی در محفظه احتراق با طول منطقی نمی‌سوزد. این عیب در شکل ۴ نشان داده شده است. که در آن فشار در راستای خط مرکزی یک محفظه احتراق مستطیل شکل اندازه‌گیری شده‌است. سوخت به دو صورت دیواره و مرکزی پاشش شده است. همان طور که مشاهده می‌شود فشار ناشی از سوخت پاشش شده از دیواره پشت یک پله، نسبت به انژکتور مرکزی، بسیار پایین‌تر است. به علاوه اگر افزایش فشار تولید شده در هوا با استفاده از انژکتور پله‌ای با آنچه در نیتروژن اتفاق می افتد مقایسه شود، نتیجه می گیریم که احتراق انجام نشده است[۲].




شکل ۴ فشار سکون در یک محفظه احتراق با سیستم‌های مختلف سوزش[۲]

دلایل عدم وقوع احتراق مشخص نمی‌باشد. تفاوت اساسی بین پاشش از طریق دیواره و مرکز این است که سوخت پاشش شده از دیواره، نزدیک یک دیوار سرد است در حالی که سوخت پاشش شده مرکزی، به وسط جریان آزاد پاشش می‌شود. می‌توان گفت یک عیب سیستم‌های پاشش دیواره این است که سوخت پاشش شده از دیواره تنها یک سطح مرزی دیفیوژنی دارند در حالی که در سیستم پاشش مرکزی دو سطح وجود دارد که سرعت اختلاط را در شرایط مساوی بیشتر می‌کند. این امر شاید دلیلی برای کندی فرایند سوزش باشد اما دلیل توقف کامل آن نمی باشد. حضور دیوار سرد بر فرایند دیفیوژن و سوزش سوخت اثر عکس دارد. مورگان و همکارانش در سال ۱۹۸۷ نشان دادند که دیواره سرد، دمای مخلوط هوا-سوخت را در نزدیکی دیواره کاهش داده که این موضوع در پاشش مرکزی وجود ندارد. در مورد پاشش دیواره، باید در نظر داشت که بخش زیادی از سوخت در این قسمت قرار دارد. بنابراین در این قسمت، سوخت به دمای خود سوزی ( self ignition) نمی‌رسد یعنی توسط دیواره سرد فروکش می‌کند[۳]. این فرض با نتایج کار آقای موریس در سال ۱۹۸۹ که مخلوطی از سیلان(silane) و هیدروژن را به عنوان سوخت استفاده کرد، همخوانی دارد. سیلان دمای سوزش بسیار پایینی دارد. بنابراین این دمای پایین نباید بر سوزش آن تاثیر بگذارد. بنابراین مشاهده شد که بخش عمده‌ای از سوزش وقتی مخلوط سیلان-هیدروژن از دیواره پاشش می‌شود، اتفاق می افتد. به‌علاوه سوزش می تواند در نسبت‌های تعادل پایین مشاهده شود. این موضوع این فرضیه را تقویت کرد که اثرات دیواره است که سوزش را متوقف می‌سازد[۴].

با این حال برسیانینی با یک مطالعه عددی که دمای دیواره محفظه احتراق را متغیر شبیه‌سازی کرد، نشان داد که مسأله این نیست. این مطالعه نشان داد که کاهش دما در دیواره خیلی مهم نیست و دمای کافی برای سوزش هیدروژن نزدیک دیواره وجود دارد. این تحقیق بیان می‌داشت که وقتی سوخت از پشت یک پله در محفظه احتراق پاشش می شود، کاهش اختلاط را به همراه دارد. برای افزایش فرایند اختلاط وقتی که از دیواره پاشش انجام می‌شود، برسیانینی تعدادی گوه برای افزایش اختلاط در پایین دست انژکتور، در محفظه قرار داد. اما این عمل نیز تأثیر زیادی بر فرایند احتراق نداشت و تنها وقتی فشار افزایش یابد، تأثیر ناچیزی مشاهده شد. دمای سوخت بلافاصله پایین دست جریان انژکتور تقریباً $K^o$ ۱۷۵ بود که دمای دیواره در سراسر آزمایش در دمای اتاق بود. کاملاً واضح است که کمبود اختلاط در نرخ تعادل نزدیک به ۱ اتفاق می افتد. با این حال مورگان و برسیانینی و همکاران به طور جداگانه و مستقل مشاهده کردند پاشش از دیواره از پشت یک پله منجر به احتراق می شود اگر نسبت تعادل بیش از ۲ باشد که در شکل ۵ مشاهده می شود[۵]. در این شکل ایمپالس مخصوص بر حسب نرخ تعادل رسم شده است. تحقیقات در این زمینه که چرا این اتفاق افتاده است هرگز دنبال نشده با این حال اگر اختلاط محدود باشد، یک دلیل احتمالی برای افزایش سوزش، حضور بیشتر سوخت در طول دیواره، نرخ پراکندگی سوخت در هوا افزایش خواهد داد. بنابراین سوخت بیشتری با هوا در تماس خواهد بود که احتمالاً منجر به سوختن می شود. مقداری نفوذ هم با توجه به افزایش سوخت در محفظه احتراق انجام می شود. اگر فشار در هنگام خروج سوخت بیشتر از فشار جریان باشد آنگاه سوخت از دیواره دور شده و وارد جریان آزاد شده و در نتیجه مکانیزم نفوذ رخ می دهد. اگر فرض دیواره سرد را هم در نظر بگیریم افزایش سوخت باعث می شود مقدار بیشتری از سوخت از دیواره فاصله گرفته و اثر دیواره کمتر گردد.

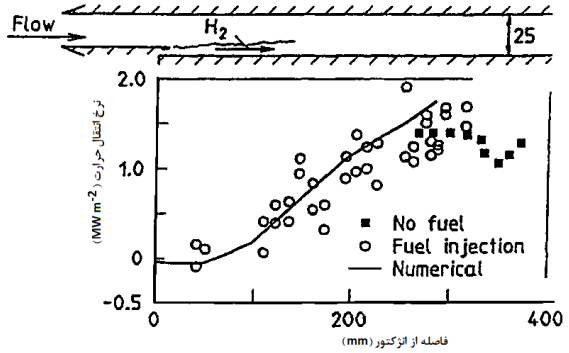



شکل ۵ ضربه مخصوص به‌عنوان تابعی از نسبت تعادل

در مجموع می توان گفت دلایل کاهش احتراق هیدروژن وقتی که از یک پله در دیواره پاشش می شود، نامعلوم است[۶ و ۷].

### ۳-۱- پاشش دیواره و نتایج خنک کاری لایه‌ای

اگرچه همه سوخت پاشش شده در محفظه احتراق، وقتی که پاشش از دیواره داریم، نمی‌سوزد اما نمی‌توان گفت که این مدل سیستم پاشش ناکارآمد است، چرا که وقتی عملکرد بازه کلی موتور را ارزیابی می‌کنیم، مزایایی که از یک لایه سوخت نزدیک به دیواره به دست می‌آید، که منجر به کاهش دما و احتمالاً خوردگی سطحی محفظه احتراق می‌شود، ناکارآمدی ناشی از سوخت هدر رفته کمرنگ می‌شود. برای به دست آوردن دید کلی از حفاظت گرمایی که توسط لایه‌ای از هیدروژن در طول دیواره به دست می‌آید، اندازه گیری‌هایی از انتقال حرارت توسط stalker1990 و همکاران در محفظه احتراق اسکرمجت با سیستم پاشش دیواره‌ای انجام شده است[۸].

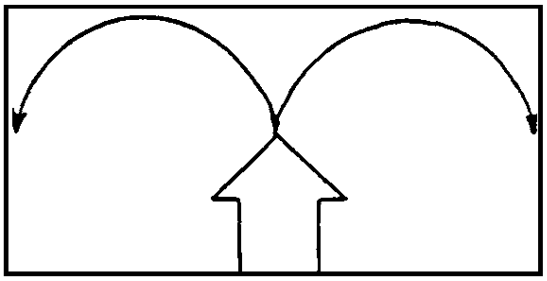



شکل ۶ اثر خنک کنندگی لایه‌ای هیدروژن[۸]

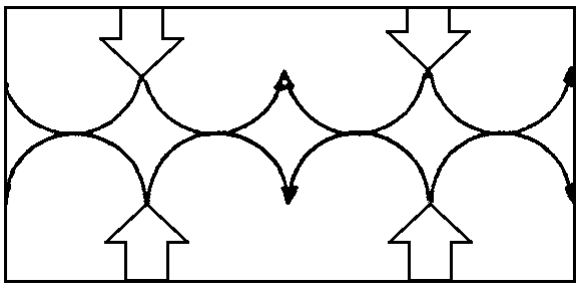
در این شکل نرخ انتقال حرارت دیواره پایین دست جریان، پاشش دیواره در حضور و عدم حضور سوخت نمایش داده شده است. آنتالپی سکون و ماخ جریان به ترتیب MJ/kg ۴.۲ و ۳.۵ می‌باشد. سوخت با نرخ جریان جرمی که نرخ تعادل ۱.۴ را تولید می کند، پاشش می‌شود. سطح مقطع محفظه احتراق mm ۵۴×۲۷ است و همانطور که در شکل نمایش داده شده سوخت در طول مقطع ۵۴ میلی‌متری پاشش می شود. بدون حضور احتراق، می‌توان گفت هیدروژن یک خنک کننده کارا می باشد. نرخ انتقال حرارت، در فاصله تقریباً دو برابر ارتفاع مجرا از انژکتور به صفر کاهش می‌یابد و برای اینکه مقدار آن به قبل از پاشش سوخت برسد، ۶ برابر این فاصله نیاز است. متاسفانه در این نرخ جریان جرمی، احتراق انجام نمی‌شود. بنابراین ممکن است نتایج در حضور احتراق کاملاً متفاوت باشد. همچنین این نتایج در ارتفاع متفاوت خواهد بود چرا که دمای دیواره بسیار بیشتر از دمای دیوار سرد استفاده شده در اینجا خواهد بود[۸].

### ٤- پاشش درگاهی

برای یک اسکرمجت در حال کار، پاشش درگاهی یک گزینه ایده‌آل برای انتقال سوخت به هوا به نظر می‌آید. اگر فشار دینامیک در مقایسه با فشار جریان زیاد باشد و منافذ درگاه پاشش سوخت خیلی کوچک نباشد، نفوذ سوخت به جریان آزاد انجام خواهد شد. در این نوع سیستم از پاشش، نفوذ سوخت به جریان آزاد در زوایای بیشتر از ۱۵ درجه، به زاویه پاشش حساس نمی‌باشد. بنابراین نیاز نیست الزامی نیست که پاشش به صورت عمود بر صفحه انجام شود. اما می تواند تحت یک زاویه‌ای به جریان انجام شود تا اینکه جزئی از اندازه حرکت ناشی از آن، به پایین دست جریان هدایت شود که افزایش تراست را در پی دارد. آزمایش‌هایی برای نشان دادن کارایی پیکربندی‌های مختلف انژکتورهای درگاهی که توسط مورگان انجام شده که نمونه‌هایی از آن در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است[۴].



شکل ۷ پاش درگاهی از یک روزن[۴]



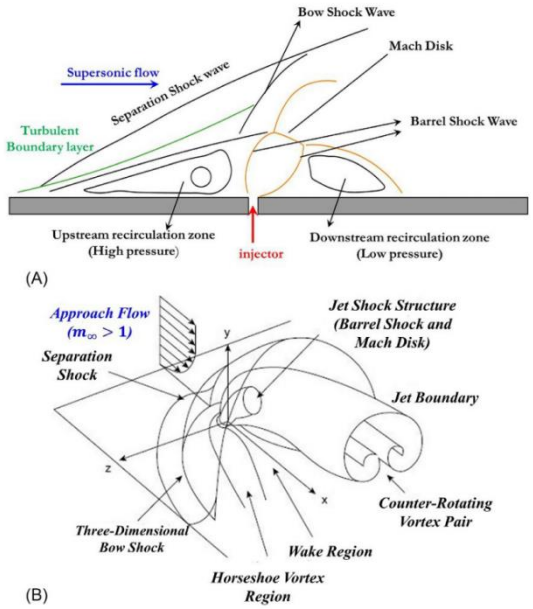
شکل ۸ پاشش درگاهی از منافذ چندگانه[۴]

سطح مقطع محفظه احتراق در این آزمایش، برابر با mm ۲۵×۵۰ است. در هر دو آزمایش، هیدروژن با زاویه ۳۰ درجه نسبت به جریان آزاد به پایین دست پاشش می شود. در اولین پیکربندی، ۷ سوخت به طور صوتی از یک سوراخ به قطرmm ۷ پاشش می شود. در پیکربندی دوم، ۸، سوخت به طور صوتی از ۴ سوراخ با قطر mm۳.۵ پاشش می شود. اندازه این انژکتورهای طوری انتخاب شده است که نرخ جریان جرم در هر دو مورد برای فشارهای سوخت برابر، یکسان باشد. منطقی است، وقتی سوخت از انژکتورهای چندتایی پاشش می شود، آزادسازی بیشتر انرژی به دست می آید چرا که اختلاط بیشتری انجام می شود. احتراق در این نوع سیستم از پاشش بسیار بهتر از سیستم پاشش از دیواره است و از نظر عملکردی شبیه به احتراق در سیستم پاشش مرکزی است.

آزمایش‌های دیگری توسط استاکر و ونت انجام شده که در آنها نرخ افزایش فشار در یک مجرای مستطیلی با پاشش سوخت هیدروژن به صورت مرکزی و یا یک منفذ در کنار دیوار انجام می شود، مقایسه شده است. با براوردهای تئوری و آزمایشگاهی مشاهده می شود که راندمان اختلاط هیدروژن سرد که از یک سیستم مرکزی پاشش می شود، بین ۲۰ تا ۳۵ درصد بهتر از پاشش از تک منفذ می‌باشد. وقتی که از سوخت داغ(دمای بین ۶۰۰ تا ۷۰۰ درجه کلوین) استفاده می شود نیز، راندمان اختلاط همان می‌شود. دقت نتایج آزمایشگاه محدود است اما این نتایج تئوری و تجربی با هم همخوانی دارند. همچنین با نتایج morgan1990 نیز همخوانی دارد[۹].

در برخی آزمایشات منتشر نشده تعداد زیادی از سوراخ‌های کوچک به عنوان سیستم پاشش استفاده شده و کمبود اختلاط مشاهده می شود. (افزایش فشار در محفظه احتراق در شرایطی که احتراق باید رخ داده باشد، مشاهده نشده است که دلیل آن کاهش میزان اختلاط می باشد) با کاهش تعداد سوراخ‌ها و افزایش اندازه آنها، اختلاط بهتری مشاهده می شود. قانون شست(توسط اندرسون ۱۹۹۸ ارائه شد) که بیان می کند پورت ها باید دو برابر فاصله نفوذ لازم از هم جدا باشند که معیار خوبی برای پراکندگی پورت‌ها از هم است[۱].

پاشش درگاهی درون چریان مافوق صوت از اساسی‌ترین جریان‌ها برای سیستم‌های پیشرانشی وسایل پروازی ماورای صوتی است که برای بهبود فرایند آمیختگی و احتراق جت سوخت و جریان مافوق صوت درون محفظه‌های احتراق موتور اسکرمجت مورد مطالعه قرار می‌گیرند. این ساختار جریان شامل مشخصه‌های گوناگونی از قبیل، ساختار امواج ضربه‌ای، لایه مرزی، سه بعدی بودن، جدایش جریان، بازچرخش جریان، پدیده لایه برشی آزاد محدود به دیواره، گردابه‌های مختلف و ویک جت می‌باشد. وضعیت یک جت برخوردی با جریان هوای عبوری مافوق صوت در شکل ۹ نشان داده شده‌است. در ناحیه پاشش سوخت یک موج ضربه‌ای بشکه‌ای و یک دیسک ماخ بر جت تشکیل می‌شوند و چت پاشش شده در جهت جریان هوای عبوری می‌چرخد. موج ضربه‌ای بشکه‌ای به صورت مانعی در مسیر هوای عبوری عمل می‌نماید و در نتیجه یک موج ضربه‌ای کمانی قوی در اطراف موج ضربه‌ای بشکه‌ای و در بالادست جت تشکیل می‌شود. قسمت عمودی موج ضربه‌ای کمانی یک افزایش فشاری را ایجاد می‌نماید که از طریق ناحیه مادون صوت لایه مرزی به سمت بالادست منتشر می‌شود. این گرادیان فشار معکوس منجر به جدا شدن جریان می‌شود و یک سیستم ساختارهای گردابه‌ای تولید می‌شود که در اطراف موج ضربه‌ای بشکه‌ای خم می‌شوند و به سمت پایین دست حرکت می‌نمایند. برای نسبت فشار تقریبی حدود ۵۰۰، ناحیه جدا شده دو گردابه ناهمسانگرد ایجاد می‌نماید که یکی از آنها یک گردابه نعل اسبی است که اطراف جت خم شده است. برای نسبت فشار ۱۲۰۰۰ گردابه‌های مختلفی در ناحیه جداشده ظاهر می‌شوند. در ضمن جریان جدا شده یک موج ضربه‌ای ناشی از جدایش ایجاد می‌نماید که با موج ضربه‌ای کمانی برخورد می‌نماید[۱۰].




شکل ۹ طرح شماتیک ۲-بعدی و۳-بعدی پاشش درگاهی

هنگامی که سیال جت، نازل را ترک می‌نماید به دلیل حضور جریان هوای عبوری، نیروی برشی به آن وارد می‌شود؛ سطح مشترک سیال جت تغییر شکل داده و به شکل لوبیا تبدیل می‌شود و به سمت پایین دست خم می‌شود. جفت گردابه‌های ناهمسانگرد لوبیا شکل تشکیل شده در پایین دست پلوم جت، سهم اصلی در آمیختگی سوخت پاشش شده یا هوای جریان عبوری را ایفا می‌کند. این نیروی برشی صفحه پایین دست را به دور خودش می‌چرخاند و یک جفت گردابه تشکیل می‌دهد. همچنین در ناحیه ویک جت یک ناحیه بازچرخشی و یک موج بازتراکمی حضور دارد که جریان را به جهت مماس بر دیواره جامد می‌چرخانند. ناحیه بعد از جت شامل یک ناحیه فشار پایین است که تاثیر معکوس بر نیروی تراست تولید شده توسط جت داشته و یک ممان رو به پایین بر روی وسیله پرنده ایجاد می‌نماید. یک ناحیه فشار پایین در قسمت بعد از بادپناه(بعد از جت) موج بشکه‌ای ایجاد می‌شود[۱۱].

بخش بزرگی از سیال جت از جلو و کناره‌های موج ضربه‌ای بشکه‌ای و از دیسک ماخ عبور می‌کند ولی مقدار سیال عبوری از طریق قسمت پشت به باد موج ضربه‌ای بشکه‌ای بسیار کمتر است. ناپایداری‌های کلوین-هلمهوتز در اطراف پلوم به دلیل سطح بالای برش در دو لایه برشی ایجاد می‌شوند. یکی توسط اختلاف سرعت سیال جت عبوری از طریق دیسک ماخ و قسمت جلویی موج ضربه‌ای بشکه‌ای و دیگری بین جت سیال و جریان عبوری شکل می‌گیرد. اختلاف بین یک جت گازی و یک جریان هوای عبوری مافوق صوت به مقدار زیادی بعد از اینکه جت، ناحیه احاطه شده توسط موج ضربه‌ای بشکه‌ای و دیسک ماخ را ترک نمود، اتفاق می‌افتد. اختلاط در حوزه نزدیک و دوردست بستگی به فرایندهای فیزیکی مختلفی دارد. در حوزه نزدیک، جریان‌های هوای عبوری توسط گردابه‌های مقیاس بزرگ تولید شده به درون سیال کشیده می‌شود. این گردابه‌های مقیاس بزرگ تولید شده به درون سیال کشیده می‌شوند. این گردابه‌های مقیاس بزرگ در نهایت به دلیل پهن و کج شدن به ساختارهای گردابه‌ای کوچکتری شکسته می‌شوند.

در طی این فرایند اختلاط به دلیل دیفیوژن و جابجایی آشفته اتفاق می‌افتد. در دوردست اختلاط بیشتری به دلیل وجود دیفیوژن وجود دارد[۴۹].

**۵- پاشش مرکزی**

یک انژکتور پایه‌ای دارای این مزیت است که عمق نفوذ سوخت را در مقایسه با انژکتورهای سوخت دیواره، افزایش می‌دهد. در اینجا، برای تقویت عملکرد اختلاط محفظه احتراق، پاشش سوخت به صورت مستقیم در جریان اصلی انجام می‌شود. در این رویکرد، پیشرفت قابل توجهی در اختلاط سوخت و هوا همانند پایداری شعله حاصل می‌شود.

در یک سیستم پاشش مرکزی، سوخت از طریق یک پایه که در طول محفظه احتراق قرار گرفته منتقل می شود. بخش زیادی از آزمایش‌های انجام شده در $T_3$ و $T_4$ از این نوع از انژکتور استفاده کرده است چرا که ثابت شد این نوع سیستم یک وسیله کارا و نسبتاً ساده برای انتقال سوخت می باشد. در دو بخش آتی نتایج مختلف که به فهم این نوع از انتقال سوخت و توسعه نازل تراست مناسب برای چنین انژکتورها، ارائه شده است[۱۳].

دیگزیت و همکاران مدل‌سازی ریاضی و تحلیل انواع مختلف انژکتور سوخت در موتور اسکرمجت را با استفاده از شبیه‌سازی عددی بررسی نموده‌اند که از معادلات دو بعدی ناویر-استوکس با مدل آشفتگی $k$-$\varepsilon$ و مدل واکنشی اضمحلال گردابه نرخ محدود برای شبیه‌سازی حوزه جریان پاشش سوخت هیدروژن در محفظه احتراق اسکرمجت با انواع مختلف انژکتور از قبیل تک دیواره، دو دیواره و ساختار مرکزی استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پاشش از انژکتور مرکزی نتایج بهتری را در مقایسه با دو انژکتور دیگر داراست. گردابه تولید شده توسط پایه به صورت شعله نگهدار در محفظه احتراق عمل می‌نماید و می‌تواند موجب افزایش زمان اقامت مخلوط در جریان مافوق صوت باشد[۱۴].

**۶- روش‌های بهبود فرایند آمیختگی**

پاشش درگاهی و مرکزی دو روشی هستند که معمولاً در محفظه احتراق اسکرمجت استفاده می‌شوند. پاشش درگاهی در مقایسه با پاشش مرکزی عمق نفوذ بیشتری ایجاد نموده و عملکرد آمیختگی بهتری دارد ولی تلفات فشار بیشتری ایجاد می‌کند. اختلاط کافی بین جریان مافوق صوت و جت سوخت متقاطع برای فرایند احتراق بسیار مهم است. وسایل و روش‌های جدید بهبود آمیختگی سوخت و هوا توسط محققین زیادی بررسی و پیشنهاد شده است. به طور کلی برای افزایش راندمان احتراق و کاهش اندازه محفظه احتراق، آمیختگی بین جت سوخت و جریان‌های عبوری باید بیشینه شود. برای بهبود فرایند آمیختگی دو دسته روش وجود دارد که در حال توسعه می‌باشد. دسته اول مربوط به روش‌های غیر فعال می‌باشد. در این روش‌ها نیازی به توان کمکی نیست و می‌تواند شامل حفره‌ها، رمپ‌ها و یا تولیدکننده‌های گردابه باشد. مزیت اصلی این این دسته سادگی آنها، وزن کمتر و تعمیر و نگهداری می‌باشد. اما عیب این دسته این است که در بازه کوچکی از شرایط عملکردی موثر می‌باشند و در بعضی موقعیت‌ها ممکن است تاثیر منفی بر روی کارایی موتور داشته باشد. برخی از مهم‌ترین روش‌های غیرفعال پاشش سوخت در جریان مافوق صوت شامل موارد زیر می‌باشد:

۱- پاشش چندتایی
۲- پاشش متقاطع سوخت در یک کانال با سطح مقطع ثابت
۳- پاشش متقاطع یک مرحله‌ای سوخت بعد از یک پله
۴- پاشش متقاطع دومرحله سوخت بعد از یک پله
۵- پاشش مماسی یا زاویه‌دار سوخت
۶- پاشش سوخت به همراه حفره‌ها
۷- پاشش سوخت از طریق یک رمپ
۸- پاشش سوخت با استفاده انژکتور سوخت رمپ آیرودینامیکی
۹- پاشش سوخت با استفاده از پایلون‌ها و تیغه‌ها
۱۰- شکل نازل انژکتور
۱۱- پاشش بعد از دیواره موج‌دار

در روش‌های کنترل فعال، برخلاف روش‌های غیرفعال، نیازمند یک منبع انرژی می‌باشد. تحقیقات بر روی این روش‌ها از دهه ۱۹۹۰ شروع شده و فعالیت‌های بزرگی در این زمینه انجام شده‌است. از جمله می‌توان به عملگرهایی شامل فلاپ‌های پیزو-الکتریک، عملگرهای پلاسمایی، عملگرهای نیروی لورنتز و جت‌های مصنوعی اشاره کرد[۱۵].

**۷- جمع بندی**

فرایند اختلاط در محفظه احتراق موتور اسکرمجت نقش اساسی در عملکرد موتور دارد و پاشش سوخت باید به گونه‌ای باشد که پایداری شعله را در ماخ پروازی بالا حفظ نماید. همچنین بهتر است فرایند خنک کنندگی محفظه احتراق نیز با سوخت انجام شده تا عملکرد کلی موتور نیز افزایش یابد.

**۸- مراجع**

[1] E. T. Curran, S. N. B. Murthy, Scramjet Propulsion, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000 - Technology & Engineering

[2] Morgan, R. G, and McGregor, W., "Liquid Fuelled Scramjet, Shock Tunnel Experiments," presented at 12th ISABE, 1995.

[3] Morgan, R. G, "Supersonic Combustion with Transverse, Circular Wall Jets, Shock TUnnel Studies for Scramjet Phenomena," Supplement 5, NASA CR 182096,1990, pp. 20-39.

[4] Morris, N. A., "Silane as an Ignition Aid in Scramjets," Ph.D. Thesis, Univ. of Queensland, Australia, 1989.

[5] Brescianini, C, "Wall Injected Scramjet Experiments, Shock Tunnel Studies for Scramjet Phenomena," Supplement 5, NASA CR 182096,1990, pp. 15-19.

[6] Brescianini, C P., "An Investigation of the Wall-Injected Scramjet," Ph.D. Thesis, Univ. of Queensland, Australia, 1993.

[7] Morgan, R. G., Paull, A., Morris, N., and Stalker, R. J., "Scramjet Sidewall Burning—Preliminary Shock Tunnel Results," Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Queensland, Australia, Dec. 1985

[8] Stalker, R. J., Morgan, R. G., Paull, A., and Brescianini, C. P., "Scramjet Experiments in Free Piston Shock Tunnels," NASP CR 1100,1990.

[9] Wendt, M. R, and Stalker, R. J., "Transverse and Parallel Injection of Hydrogen with Supersonic Combustion in a Shock Tunnel," Shock Waves, Vol. 6, No. 1, June 1996, pp. 53-59

[10] Liu Q, Baccarella D, Lee T. Review of combustion stabilization for hypersonic air-breathing propulsion. Prog Aerosp Sci 2020;119, 100636.

[11] D. Rodroguez, “Numerical simulation of a flow field around a hypersonic missile with lateral Jets”, Phd. Thesis, Florida Atlantic University, 2017

[12] D. A. Dickmann, F. K. Lu, “Shock/Boundary-Layer interaction effects on transvers jets in crossflow at flat plane”, Journal of spacecraft and rockets, vol. 46, No. 6, pp. 1132-1141, 2009

[13] Pulsonetti, M. V, and Stalker, R. ji, "A Study of Scramjet Scaling," AIAA Paper 96-4533,1996

[14] S. Dixit, “Mathematical modeling and Analysis of different type of fuel injection in scramjet engine using CFD simulation in Fluent”, international Journal of research in Applied Science and engineering Technology, Vol. V, No. II, pp. 379-389, 2017

[۱۵] زاهد زاده، م. مطالعه عددی پاشش متقاطع سوخت در جریان مافوق صوت درون محفظه احتراق یک موتور اسکرمجت، پایان نامه دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۴۰۱