

امکان‌سنجی و تبیین سیستم دمش شیمیایی در فشار گذاری مخازن پیشران مایع خوداشتعال دیرجوش

حسن کریمی مزرعه‌شاهی^۱، سعید شهریاری^۲، امیر زنج^۳

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
shahryarisaeed@yahoo.com

چکیده

همانطور که می‌دانیم مخازن حاوی پیشران در موشک‌های سوخت مایع، دارای بیشترین حجم و جرم می‌باشد. لذا در طراحی موشک‌ها در تمامی ابعاد توجه خاصی روی طراحی مخازن پیشران می‌باشد. یکی از مسائلی که در این رابطه با آن مواجه هستیم میزان فشارگذاری سطح مایع، برای جلوگیری کاویتاسیون جریان در ورودی پمپ‌ها می‌باشد. این فشارگذاری باید به نحوی انجام شود که در طول کارکرد در تمامی شرایط پروازی، فشار ورودی به پمپ همواره در حد ثابتی باقی بماند. در این مقاله پس از مقایسه اجمالی انواع سیستم‌های دمش به امکان‌سنجی و بررسی اصول و نحوه عملکرد سیستم دمش شیمیایی به عنوان سیستمی نو، سبک، ساده و ارزان اما در عین حال کارا و سازگار با تکنولوژی‌های داخلی، خواهیم پرداخت. در این روش سیال عامل فشارنده مستقیماً توسط احتراق خودبخودی پیشران و واکنشگر درون مخازن موجود می‌آید. در انتها نیز رفتار دمش شیمیایی در یک نمونه آزمایشی در ابعاد کوچکتر مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: واکنشگر - پاشش سطحی - فشار بالشتک - انژکتور پاشش - دی متیل هیدرازین

1- مقدمه

نحوه تغذیه پیشران (سوخت و اکسنده) به محفظه احتراق در موتور موشک‌ها عموماً به دو صورت انجام می‌شود [1] که عبارتند از: سیستم تغذیه فشاری (Pressure-Fed System) و سیستم تغذیه توربوپمپی (Pump-Fed System). در موشک‌هایی که سیستم دمش آنها براساس تغذیه فشاری می‌باشد، فشار بالشتک وظیفه راندن پیشران از خطوط تغذیه به داخل محفظه احتراق موتور را با دبی و فشار مناسب بر عهده دارد. در سیستم‌های تغذیه توربوپمپی، فشار بالشتک، پیشران را با شرایط مناسب به قسمت ورودی پمپ‌های تغذیه موتور می‌رساند. صرف نظر از نوع سیستم دمش نکات مهم در طراحی سیستم دمش عبارتند از: حداقل جرم و ساده بودن سازه سیستم، بالا بودن ضریب اطمینان کاری، پایین بودن هزینه ساخت، حداقل زمان طراحی و تست سیستم، آمادگی دائم برای استارت در شرایط متفاوت، ثبات پارامترهای سیستم در مقادیر طراحی شده فشار، دما و دبی جرمی گاز [7]. سیستم‌های دمش را می‌توان براساس نوع گاز دمش و هم‌چنین ساختار سیستم دمش چه از نقطه نظر وضعیت فیزیکی و چه از لحاظ روش به دست آوردن سیال کاری دمش طبقه‌بندی کرد. هرکدام از این سیستم‌ها نیز دارای

1- دانشیار دانشگاه

2- دانشجوی کارشناسی ارشد

3- دانشجوی کارشناسی ارشد

انواع مختلفی می‌باشند که با توجه به نیازمندی‌های موتور از یک و یا ترکیبی از این سیستم‌ها جهت دمش مخازن استفاده می‌گردد. در زیر به اختصار سیستم‌های متفاوت بیان شده‌اند. شرح کامل انواع سیستم‌ها در مرجع [2] آورده شده است. تاریخچه سیستم دمش شیمیایی به سال 1960 بر می‌گردد. در این سال‌ها تحقیقات متعددی هم در زمینه فشارگذاری مخازن تحت فشار و هم مخازن دما پایین توسط شرکت Martin Marietta Denver Aerospace انجام گرفت [1]. یکی از موضوعات جالب توجه برای این شرکت فشارگذاری از طریق احتراق درون تانک (MTI) Main Tank Injection یا همان دمش شیمیایی بود.

علی‌رغم سادگی این سیستم و کاهش شدید هزینه و وزن پروازی، این پروژه به این دلیل که ریسک احتراق درون مخازن بالا به نظر می‌رسید، تا مدت‌ها عملی نشد. تا اینکه در پرتابگر Titan II مورد بررسی قرار گرفت. در سال‌های 1964 تا 1968 آقایان Paul A. Friedman و Richard A. Kenny تحقیقاتی را در زمینه MTI انجام دادند [3]. این تحقیقات بر روی موشک حامل Titan II و در ابعاد واقعی انجام شد و امکان‌سنجی آن مورد بررسی قرار گرفت. در سال‌های 1969 و 1971 آقایان J.C. Howell و A. Fester تحقیقاتی را روی کاربردی بودن این سیستم‌ها در موشک‌های هوا به زمین (PLM) انجام دادند و نتایج مساعدی را در شرایط مانور پروازی در شتاب‌های مختلف بدست آوردند [1]. از سالها 1970 به بعد تحقیقاتی در زمینه بکارگیری این سیستم با پیشرانهای دما پایین (Cryogenic) نیز آغاز شد. این تحقیقات توسط آقایان D.W. Kendle و E.C. Cady روی سیستم در ابعاد واقعی هیدروژن مایع انجام گرفت. آخرین ردپای بدست آمده بر روی سیستم دمش شیمیایی مربوط به 54 امین کنفرانس AIAA در آلمان می‌شود که توسط آقایان Paul E. Bingham و Dale A. Fester روی پیشران‌های مایع انجام شد. در ادامه مختصری در رابطه با انواع سیستم دمش پرداخته شده است.

1-1- سیستم ذخیره گاز خنثی

در سیستم ذخیره گاز خنثی، یک گاز که از نظر انجام واکنش شیمیایی با پیشران خنثی می‌باشد، در مخازن مخصوصی نگهداری می‌شود. پس از باز شدن شیر قطع و وصل جریان، گاز دمش از مخازن خود که تحت فشار در آن‌ها ذخیره شده است خارج شده و پس از عبور از خطوط تغذیه و در صورت لزوم گذر از مبدل حرارتی وارد مخازن سوخت و اکسند می‌شود و آن‌ها را تحت فشار قرار می‌دهد. در نهایت این سیستم با تمام پیشران‌ها سازگار است، هرچند که برای بعضی گازها مانند نیتروژن مشکل چگالش وجود خواهد داشت اما با تمام سادگی، کنترل حرارتی آن (در صورت نیاز) ممکن است پیچیدگی سیستم را افزایش دهد. وزن سیستم ذخیره و همچنین وزن گاز در سیستم‌های بزرگ می‌تواند خیلی زیاد باشد [2].

1-2- سیستم تبخیر پیشران

در این سیستم قسمتی از سوخت یا اکسند مایع در یک منبع مبدل حرارتی تبخیر شده و بخار حاصل برای تحت فشار قرار دادن مخازن اصلی به کار گرفته می‌شود. عموماً در این سیستم، پیشران با ذرات (محصولات) خودی سازگار است ولی رگولاتور و اواپراتور جداگانه می‌تواند موجب پیچیدگی سیستم شود. وزن گاز هم ممکن است زیاد باشد اما وزن مخزن ذخیره وجود ندارد.

1-3- سیستم استفاده از محصولات احتراق

در این روش معمولاً گازهای حاصل از احتراق سوخت‌های جامد یا مایع در داخل مولد گاز سوخت جامد یا مولد گاز سوخت مایع از طریق کانال‌های مربوطه وارد مخازن اصلی سوخت و اکسند شده، آن‌ها را تحت فشار قرار می‌دهد. در نهایت این سیستم، ساده ولی کمتر از دو سیستم دیگر قابل اعتماد است (مولد گاز و کولر گاز احتمالی پیچیدگی را افزایش می‌دهد)، وزن گاز ممکن است زیاد باشد اما وزن سیستم ذخیره نسبتاً کم است.

1-4- سیستم دمش شیمیایی (Chemical Pressurization)

در این نوع سیستم‌ها برای تحت فشار قرار دادن مخزن سوخت و اکسنده مقداری اکسنده و سوخت به ترتیب به داخل مخازن اصلی تزریق می‌گردد و سوخت و اکسنده در تماس با یکدیگر محترق شده و گازهای حاصل مخزن را تحت فشار قرار خواهند داد. سیستم تزریق موازی و سیستم تزریق سری از انواع مختلف این گونه سیستم‌ها می‌باشد [4].

2- انتخاب سیستم دمش

مهمترین تصمیم در طراحی یک سیستم دمش، انتخاب نوع آن می‌باشد. نیازهای مأموریتی وسیله فضایی (از قبیل مدت زمان کار موتور، زمان استارت و غیره)، سازگاری گاز عامل فشار با سوخت و اکسنده (بی‌اثر بودن گاز از نظر شیمیایی، نداشتن اجزاء قابل تقطیر)، پیچیدگی و قابلیت اطمینان سیستم (شامل تعداد موارد خرابی سیستم) و همچنین کارایی سیستم (شامل وزن سیستم دمش) از جمله مهمترین معیارها در انتخاب و طراحی و تحلیل سیستم‌های دمش می‌باشند. چهار نوع سیستم فشار ذکر شده دارای تفاوت‌های عمده‌ای در نوع ذخیره و منبع گاز فشارنده، خصوصیات سازگاری و مناسب بودن برای مأموریت‌های مختلف می‌باشند. در نتیجه برای انتخاب بهترین سیستم فشار ممکن برای یک مأموریت خاص، باید ارزیابی دقیقی از محدودیت‌های طراحی سیستم به عمل آید. بهترین گزینه ممکن، سبک وزن‌ترین سیستمی است که از محدودیت‌های طراحی تجاوز نکند و با اهداف قابلیت اطمینان و هزینه پائین تطابق داشته باشد. در گذشته بهترین گزینه ممکن معمولاً سیستم‌های نوع گاز خنثی یا تبخیر پیشران بوده است و امکان سنجی با سیستم‌های محصولات احتراقی محدود به چند موشک حامل نظامی و سیستم فشار مخازن سوخت بوسترهای موشک تیتان بوده است [1]. در ادامه به امکان‌سنجی دمش شیمیایی به عنوان یک سیستم نو و بهینه برای سوخت‌های خوداشتعال می‌پردازیم.

3- بررسی نحوه عملکرد سیستم دمش شیمیایی

همانطور که در سیستم‌های بالا مشاهده کردیم تقریباً تمامی سیستم‌های دمش علاوه بر قسمت‌های کنترلی خود، وزن اضافه‌ای را بر سیستم تحمیل می‌کنند. در سیستم گاز خنثی، وزن مخزن ذخیره گاز، در سیستم مولد گازی وزن مولد گاز، در سیستم گاز میکسر وزن میکسر و در سیستم تبخیر پیشران وزن مبدل حرارتی، وزن‌های اضافی هستند که همواره بر سیستم تحمیل می‌شوند که با بکارگیری سیستم دمش شیمیایی می‌توان از آنها اجتناب کرد. از طرف دیگر چنانچه بتوانیم از طریق وارد کردن واکنشگرهای خود اشتعال با پیشران‌ها به داخل مخازن مستقیماً گاز دمش را تولید کنیم، علاوه بر سبکی سیستم خواهیم توانست سیستم دمش را تا حد مطلوبی ساده‌سازی کنیم، که این امر موجب بالا رفتن قابلیت اعتماد سیستم نیز می‌شود. از دیدگاهی دیگر استفاده از سیستم‌های متفاوت برای دمش هر دو مخزن به صورت مجزا باعث پیچیدگی در سیستم‌ها نیوماتیکی و هیدرولیکی موتور می‌شود که همین امر خود ضرورتی دیگر برای تحقیق در مورد سیستم شیمیایی می‌باشد.

همانطور که ذکر شد در سیستم دمش شیمیایی، سیال گازی فشارنده مستقیماً در داخل مخازن پیشران تهیه می‌شود. در طراحی این سیستم‌ها برای سادگی سیستم دمش، سعی بر این است که تنها از خود سوخت و اکسنده داخل مخازن استفاده شود. یعنی از پیشران سوخت به عنوان واکنشگر (reagent) در پیشران اکسید و از اکسنده به عنوان واکنشگر در پیشران سوخت استفاده شود. این نوع به کارگیری ضربدری در سیستم، وزن پروازی را تا حد قابل قبولی کاهش می‌دهد. بنابراین در طراحی سعی بر این است که سوخت و اکسنده به گونه‌ای انتخاب شوند که به شدت با یکدیگر دارای خاصیت خوداشتعالی (Hypergolic) باشند تا از حمل هرگونه واکنشگر اضافی و در نتیجه وزن اضافی، اجتناب شود. برای مثال برای اکسنده N_2O_4 می‌توان دی‌متیل هیدرازین نامتقارن (UDMH) را به عنوان واکنشگر به کار گرفت و برعکس.

طرز کار این سیستم به این صورت است که مقداری واکنشگر از طریق انژکتور پاشش درون مخزن پاشیده می‌شود، مواد واکنشگر پس از برخورد با مایع پیشران دچار خود اشتعالی شده و محصولات واکنش به عنوان ماده فشارنده مخازن بکارگرفته

می‌شود. در این احتراق خودبخودی مقداری از حرارت آزاد شده جذب مایع شده و باعث گرم شدن آن می‌شود که این خود به نوعی در بالا بردن فشار مخزن موثر می‌باشد. از مسائلی که باید در این نوع سیستم‌ها به آن دقت کرد: 1- کنترل فشار 2- کنترل دمای بالشتک می‌باشد. قابل ذکر است عملکردی از دید طراحی بهینه است که با گازهای با چگالی کمتر، عملیات فشارگذاری بهتری را انجام دهد. عملیات کنترل فشاری این نوع سیستم‌ها اغلب به صورت پریودیک وارد عمل می‌شود. هنگامی که فشار بالشتک به یک مقدار حداقلی برسد فرمان باز شدن انژکتور پاشش ارسال خواهد شد و عملیات فشارگذاری ادامه پیدا خواهد کرد تا سنسورهای فشاری فشار بیشینه را حس کنند، در این زمان است که دستور قطع پاشش صادر خواهد شد و این عملیات در طول پرواز به صورت دوره‌ای انجام می‌شود تا فشار بالشتک در یک محدوده عملیاتی ثابت باقی بماند. مشاهده می‌کنیم که سیستم کنترل فشاری این نوع دمش به دو سویچ فشار بالا و فشار پایین خلاصه می‌شود. علاوه بر این سیستم کنترل دمایی نیز وجود دارد که محدوده عملکردی دما را ثابت نگه می‌دارد که در ادامه به آن اشاره خواهد شد.

4- انواع دسته بندی دمش شیمیایی

اصولاً این نوع دمش را می‌توان از دو دیدگاه کلی دسته‌بندی کرد. دیدگاه اول مکانیزم پاشش واکنشگر که می‌تواند سطحی (Surface injection) یا زیر سطحی (Subsurface injection) باشد و دیدگاه دوم از روی فاز واکنشگر پاشش شده که می‌تواند جامد، مایع یا گاز باشد. البته دسته بندی دیگری نیز وجود دارد که بر مبنای ابزار پاشش است [1].

4-1- پاشش سطحی

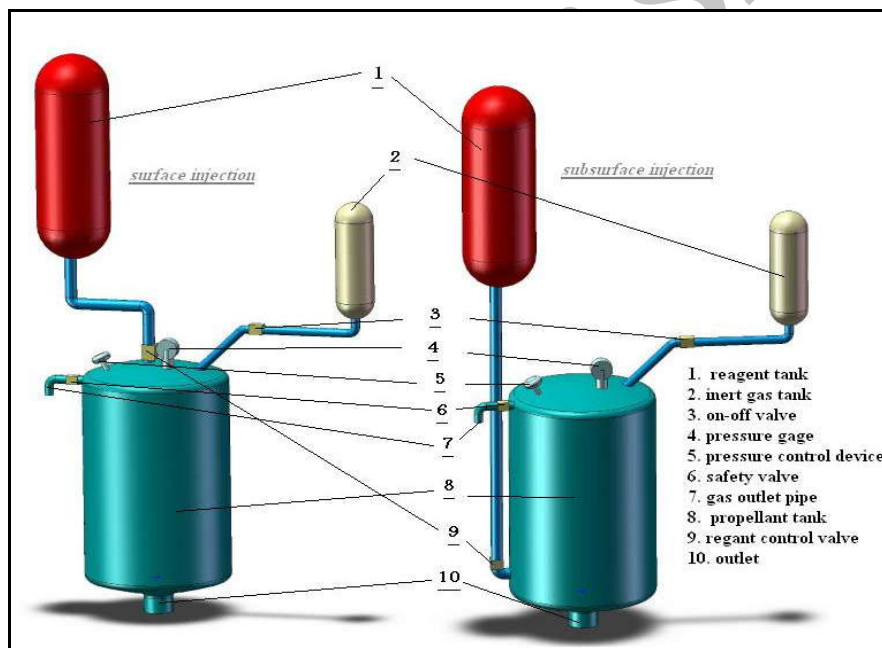
در این روش واکنشگر از مکانی در بالای مخزن به سطح پیشران پاشیده می‌شود. از نکات مهم در این نوع پاشش عمق نفوذ واکنشگر در پیشران مایع، زاویه پاشش و همچنین وسعت پاشش در سطح مایع می‌باشد. از آنجاییکه عملیات احتراق برای تولید گاز دمش به صورت خود بخودی انجام می‌شود، عمق نفوذ، تعیین کننده میزان اختلاط می‌باشد. حال اگر این عمق برای اختلاط کل واکنشگر پاشیده شده کافی نباشد، کل واکنشگر محترق نخواهد شد و در نتیجه سیستم، بازدهی لازم را نخواهد داشت. همچنین واکنشگر محترق نشده، تحت تاثیر حرارت واکنش، تبخیر شده و در فضای بالای بالشتک به صورت فاز بخار در بخار پیشران قرار می‌گیرد. این امر ممکن است پدیده موج احتراقی را باعث شود، که برای ساختار مخزن پدیده بسیار خطرناکی می‌باشد. البته معمولاً عمق نفوذ را می‌توان با انتخاب سوراخ‌های انژکتور و افت فشار انژکتور تحت کنترل قرار داد. در کل امکان سنجی این نوع پاشش در موارد متعددی آزمایش شده که نتایج قابل قبولی بدست داده است که در ادامه به آنها خواهیم پرداخت. در روش پاشش سطحی چون احتراق در لایه‌ای نزدیک سطح انجام می‌شود لذا تبادل حرارت بین محصولات احتراق و فاز مایع پیشران محدود می‌باشد، در نتیجه حرارت تولید شده در فرآیند احتراقی، بیشتر صرف گرم شدن فضای بالشتک می‌شود، همچنین میزان تقطیر محصولات احتراق هم پایین می‌آید که باعث بهتر شدن بازدهی عملیات فشار گذاری می‌شود. اما با بالا رفتن دمای بالشتک محدوده پایداری بعضی از پیشران‌ها محدود می‌شود. که این خود ما را در انتخاب پیشران محدود می‌کند. [3]

4-2- پاشش زیر سطحی

در این نوع پاشش انژکتور در ارتفاعی از کف مخزن نصب می‌شود و عملیات پاشش در آن منطقه صورت می‌گیرد. مسلماً در این روش که بهتر است تزریق نامیده شود فاکتور زاویه و عمق نفوذ وجود ندارند. اما نکته بسیار حائز اهمیت ارتفاع تزریق به داخل مایع می‌باشد. چراکه اگر ارتفاع نصب انژکتور از کف مخزن زیاد باشد، وزن مرده باقیمانده پیشران در درون مخزن افزایش پیدا می‌کند و اگر کمتر از حد مناسب باشد حباب محصولات احتراقی تولید شده به مدخل خروجی مکیده می‌شوند. در این روش مقدار حرارت آزاد شده بیشتری توسط فاز مایع پیشران جذب می‌شود لذا دمای کل مایع تا حدی بالاتر خواهد رفت. اما دمای بالشتک در حد قابل ملاحظه‌ای پایین تر نسبت به حالت پاشش سطحی می‌باشد که بسته به نوع پیشران هر کدام از

این خاصیت‌ها مطلوب می‌باشد. در پاشش زیر سطحی با حرکت حباب در درون مایع روبرو می‌باشیم که این پدیده فرکانسی را به سیستم القا می‌کند. همچنین چون دمای گازی بالشتک نسبت به پاشش سطحی کمتر می‌باشد لذا مجبوریم عملیات فشارگذاری را با گاز چگال تری انجام دهیم که این خود تا اندازه‌ای از لحاظ وزنی اثر نامطلوبی دارد. همچنین بدلیل اینکه محصولات احتراقی مدت بیشتری در محاصره مایع پیشران قرار دارند با تقطیر محصولات احتراقی مواجه هستیم که ما را ملزم به استفاده از مقدار بیشتری واکنشگر می‌کند. [3]

هر کدام از اثرات گفته شده چه برای پاشش سطحی و چه برای تزریق زیر سطحی را می‌توان با مفهوم کلی نسبت اکسند به سوخت به هم مرتبط کرد. در پاشش سطحی چه عمق پاشش و چه زاویه پاشش هر دو به صورت مستقیم در فاکتوری به نام نسبت اختلاط $k (O/F)$ مخلوط تاثیر گذارند که برای پاشش زیر سطحی نیز وضع به همین صورت است. در کل انتخاب نوع پاشش بستگی به نوع مایع پیشران دارد. اما با توجه به پیشران‌های خود اشتعال معمولی مانند N_2O_4 و $UDMH$ و ... در قیاس کلی روش پاشش سطحی، کاراتر از روش زیر سطحی نشان می‌دهد. در قسمت‌های بعدی شرح عملیات پاشش سطحی و زیر سطحی توسط یک سیستم آزمایشی در فازهای متفاوت بررسی شده‌است. در شکل 1 شماتیک کلی یک دستگاه تست آزمایشی نشان داده شده‌است. در این دستگاه مخزن سوخت شامل $UDMH$ و مخزن اکسند شامل N_2O_4 می‌باشد. شرح عملکرد این دستگاه برای انواع روشهای پاشش در فازهای متفاوت آورده شده است.



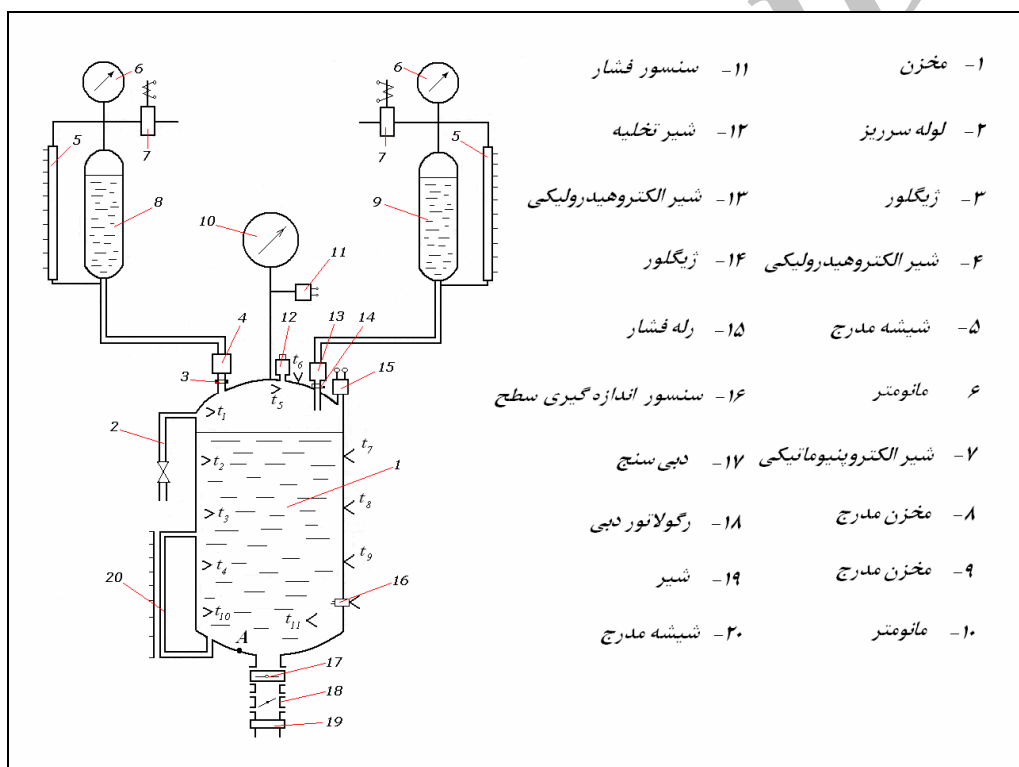
شکل 1- شماتیک دستگاه تست پاشش

5- آزمایشات تجربی

همانطور که در شکل 1 مشاهده می‌کنیم، قبل از دمش اصلی ابتدا پیش فشارگذاری مایع از طریق انژکتور پاشش نصب شده در دریچه شیر الکتروهیدرولیکی 3 انجام می‌شود. اندازه و مقدار دمش اولیه یا همان پیش فشارگذاری توسط سنسور تنظیم فشار 5 تعیین می‌شود. زمانی که پیش فشارگذاری به فشار مورد نظر رسید سنسور 5 فرمان بستن شیر 3 را ارسال می‌کند. با شروع خروج پیشران از مخزن، فشار بالشتک شروع به کاهش کرده و در فشار خاصی که فشار مینیمم می‌باشد، رله فشار به شیر 9 دستور باز شدن می‌دهد و مایع واکنشگر از طریق لوله‌های نشان داده شده، وارد مخزن می‌شود و عملیات فشارگذاری اصلی بدین ترتیب ادامه می‌یابد تا زمانی که رله فشاری، فشار ماکزیمم را احساس کند، در این لحظه دستور قطع

شیر 9 را صادر می کند و فرآیند دمش به این صورت ادامه پیدا خواهد کرد. در تست انجام شده فشار و دمای گاز دمش در مخزن، دمای مایع در خروجی، دبی واکنشگر برای دمش، گرمایش جداره و دمای بالشتک اندازه گیری شده است. بدیهی است که برای یک چنین اندازه گیری هایی به سنسورهای خاص حرارتی و فشاری در نقاطی خاص از مخزن نیازمندیم. این سنسورها به همراه نحوه چیدمان آنها در شکل 2 نشان داده شده است. [5]

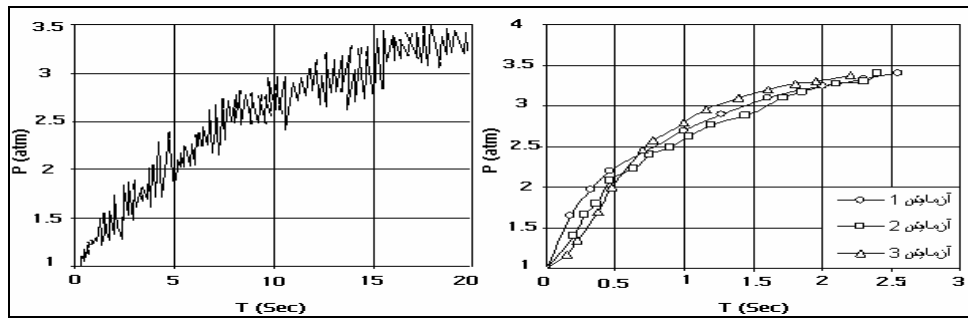
اندازه گیری های فشار در مخازن مدرج 29 و 30 به کمک مانومترهای 22 و 23 و در مخزن اصلی به کمک مانومتر 21 انجام می شود. دمای گاز داخل مخزن به کمک ترموکوپل کرومی اندازه گیری شده اند. ترموکوپل t_5 دمای داخل مخزن را با بکار انداختن سوپاپ اطمینان 12 کنترل می کند. در حین عملیات دمش، بدلیل جذب حرارت آزاد شده از احتراق در فاز مایع پیشران، افزایش دمایی را در پیشران شاهد هستیم که توسط ترموکوپلهای t_{10} و t_{11} نصب شده در یک تراز بخش تحتانی مخزن اندازه گیری می شود. سطح مایع به کمک شیشه مدرج 28 کنترل می شود. دبی خروجی از مخزن به کمک دبی سنج توربینی 17 اندازه گیری می شود. دبی جرم ورودی واکنشگر هم بر حسب تفاضل سطوح در مخزن مدرج 29 و 30 محاسبه می شوند.



شکل 2- محل قرار گیری سنسورها در دستگاه تست دمش شیمیائی [5]

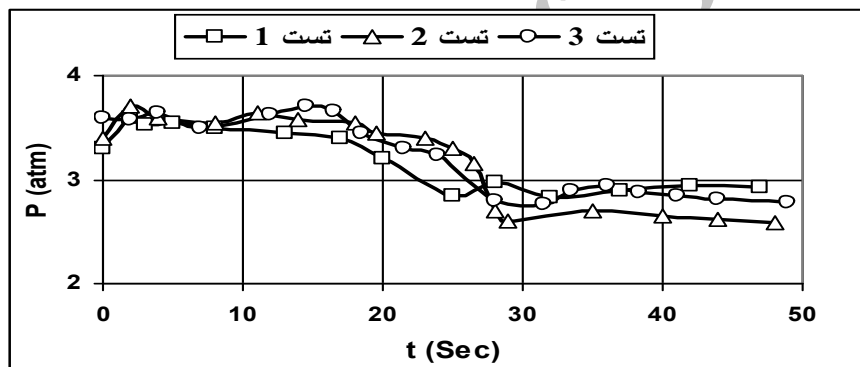
5-1- روند تغییر فشار بالشتک

تغییر فشار بالشتک برای هر دو روش وارد کردن دی متیل هیدرازین نا متقارن در مخزن سوخت در شکل 3 آورده شده است. همانطور که در شکل 3 دیده می شود، در روش سطحی، فشار بالشتک به طور یکنواخت افزایش می یابد. ثبات و پایداری عملیات در تکرار آزمایشات به طرز مطلوبی مشاهده می شود. فشار مطلوب در پاشش سطحی در مدت زمان تقریباً 2.5 ثانیه ای برای اولین دمش به دست می آید.

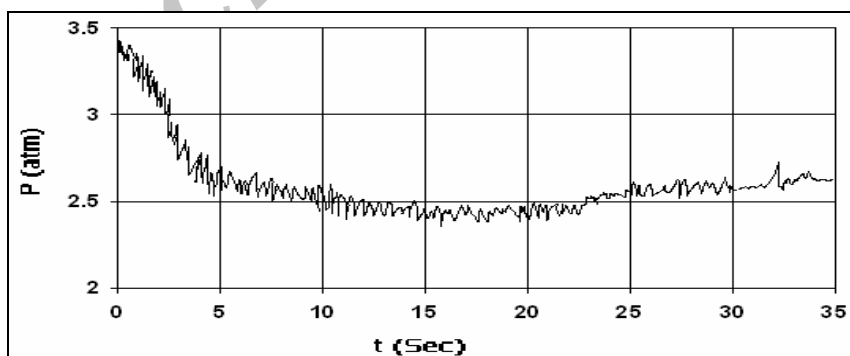


شکل 3- تغییر فشار بالشتک در مخزن سوخت به ترتیب از راست به چپ، سطحی و زیر سطحی [5]

همانطور که در روش زیر سطحی دیده می شود رابطه میان فشار بالشتک و زمان از الگوی دیگری برخوردار است. زمان رسیدن به فشار مورد نظر در دبی های یکسان سوخت تقریباً به میزان 10 برابر افزایش یافته است. افزایش فشار با پالس های قابل ملاحظه ای همراه می باشد که به دلیل آن قبلاً اشاره شد. افزایش نسبتاً آهسته فشار در مخزن به دلیل انتشار شدید گرما توسط حباب های گاز تشکیل شده در حین عبور از ضخامت سیال می باشد. نتایج تست دمش روی مخزن اکسنده در نمودار شکل های 4 و 5 آورده شده است.



شکل 4- دمش مخزن اکسنده به روش سطحی [5]



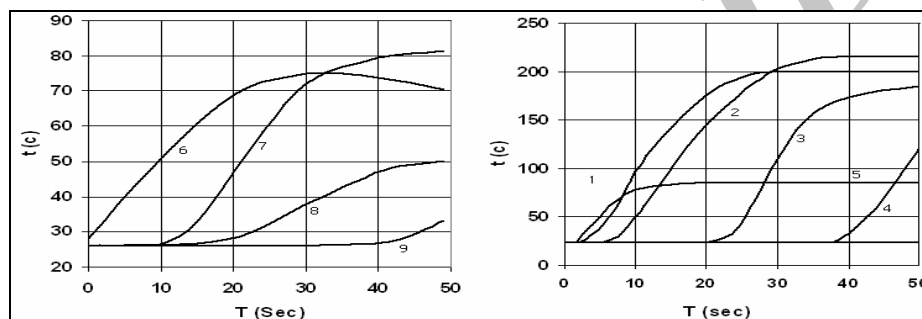
شکل 5- دمش مخزن اکسید به روش زیر سطحی [5]

اگر چه دبی های واکنشگر مایع در هر دو نوع پاشش برای مخزن اکسنده یکسان می باشد اما در نمودارها تفاوت فاحشی به چشم می خورد. همان طور که مشاهده می کنیم در دمش مخزن اکسنده نیز پاشش سطحی نتایج مطلوب تری نسبت به زیر

سطحی دارد. در تمام آزمایشات با ثابت بودن دبی واکنشگر و یکسان بودن دبی های پیشران خروجی، مقدار میانگین فشار در پاشش زیرسطحی همیشه کمتر از روش دیگر است.

5-2- روند تغییر دمای بالشتک

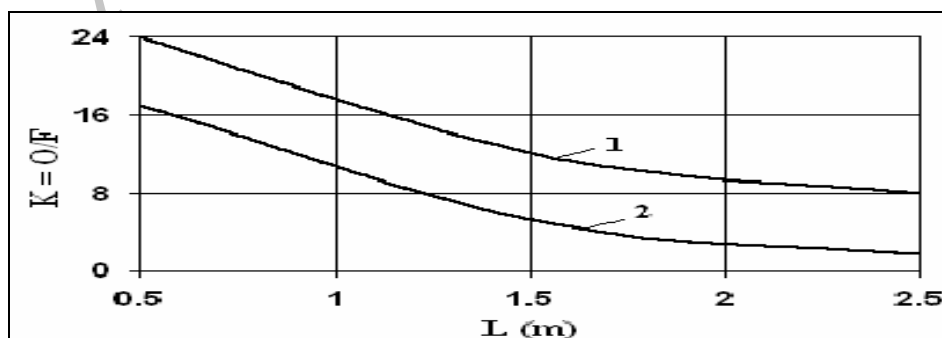
همان گونه که پیشتر ذکر شد دمای محدوده پایداری پیشران جزء قیود انتخابی سیستم می باشد، لذا در این قسمت بر آنیم تا روند گرمایش مایع پیشران و دیواره را در قیاس با گرمایش بالشتک نشان دهیم. اما در کل نتایج به دست آمده از تست های تجربی برای پاشش سطحی افزایش دمایی به اندازه $10-11^{\circ}\text{C}$ در عمق 5 میلیمتری و $1-4^{\circ}\text{C}$ در عمق 30 میلیمتری را نشان داده اند که افزایش دمای قابل قبولی در رنج پایداری پیشران انتخابی می باشد. در شکل 6 روند تغییر دمای بالشتک و دیواره در ارتفاعات مختلف نشان داده شده است. از روی شکل مشاهده می شود، در لحظه ای که پیشران از مقطعی که در آن ترموکوپل واقع شده عبور می کند، دما سریعاً افزایش پیدا می کند و دمای ماکزیمم گاز در لوله تخلیه $75-105^{\circ}\text{C}$ و دمای ماکزیمم جداره کمتر از 100°C می باشد.



شکل 6- روند تغییر دمای گاز در مقاطع مختلف و در جداره مخزن به ترتیب از راست به چپ [5]

5-3- ارتباط نوع و فشار انژکتور پاشش با نسبت اختلاط $k (O/F)$

همان طور که اشاره کردیم نسبت اکسنده به سوخت در این واکنش احتراقی نقش اساسی در کارایی سیستم دمش دارد که این نسبت اختلاط رابطه تنگاتنگی با فاصله و نوع پاشش و افت فشار انژکتور دارد. رابطه نسبت اختلاط k با فاصله انژکتور و سطح پیشران در شکل 7 نشان داده شده است. در این آزمایش از یک مخزن آلومینیومی استفاده شده که متشکل از چهار بخش می باشد. بخش تحتانی به ارتفاع 610 میلیمتر و سه بخش که هر کدام 500mm با هم فاصله دارند. با متصل کردن عدسی فوقانی به پله های مختلف مخزن، فاصله های 0/5، 1/0، 1/5، 2/0 متر از انژکتور تا سطح پیشران به دست می آید.



شکل 7- نمودار k بر حسب فواصل مختلف پاشش نسبت به سطح اکسنده در دو دبی متفاوت:

1- دبی واکنشگر 2-4 gr/s 2 - دبی واکنشگر 10-12 gr/s [5]

همانطور که در شکل 7 دیده می‌شود، منحنی 1 برای دبی واکنشگر 2-4 gr/s و منحنی 2 برای دبی 10-12 gr/s رسم شده‌اند. لازم به ذکر است که در این آزمایش سوخت به سطح اکسندۀ پاشیده می‌شود. دلیل پایین آمدن k در منحنی 2 این است که برای داشتن دبی بیشتر از انژکتور نیاز داریم افت فشار انژکتور را بیشتر کنیم که نتیجه آن پاشش نازکتر و دقیق‌تر سوخت به سطح اکسندۀ است، لذا در این پاشش نفوذ و اختلاط مناسب‌تری خواهیم داشت. قطرات بیشتری از واکنشگر در احتراق شرکت می‌کنند و باعث کاهش نسبت اختلاط می‌شوند. افزایش فاصله از سطح پیشران نیز اثری مشابه آن چه گفته شد، دارد. به همین ترتیب برای مخزن سوخت نیز می‌توان نتایج مشابهی به دست آورد. اما کلیت مسأله نشان می‌دهد که هنگام پاشش سطحی برای پیشران‌های N_2O_4 و UDMH نسبت اختلاط k همواره برای مخزن اکسندۀ بیشتر از ضریب استوکیومتری و برای مخزن سوخت کمتر از ضریب استوکیومتری می‌باشد.

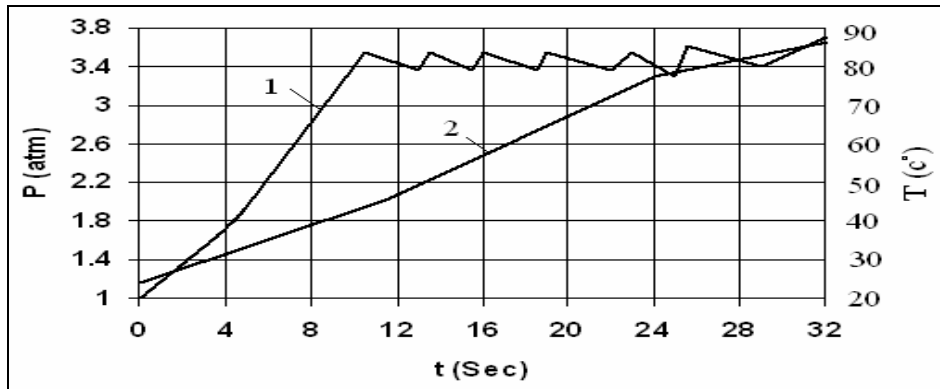
نتایج آزمایشات مشابه با واکنشگرهای مختلف برای مخزن سوخت MHF-5 به طور خلاصه در جدول 1 آورده شده است. این آزمایشات برای حجم اولیه بالشتک در دماها و دبی‌های متفاوت واکنشگر انجام شده است. واضح است که پاشش CIF5 موثرتر از IRFNA می‌باشد. شکل 8 نمودار کلی کارکرد سیستم دمش پالسی برای پیشران N_2O_4 را با دمش دی‌متیل‌هیدرازین نامتقارن در پاشش سطحی نشان می‌دهد.

جدول 1- نتایج آزمایشات مشابه با واکنشگرهای مختلف برای مخزن سوخت MHF-5 [3]

واکنشگر	بالشتک درصد حجم اولیه	زمان از پاشش	دبی واکنشگر kg/s	کامای بیشینه	دقت فشار گذاری %	
					در شروع	در پایان
IRFNA	20	30	0/798	4/4	2/8	0/19
CLF5	20	28/6	0/381	669	0/88	0/38
CLF5	14	34/4	0/653	656	1/1	0/44
CLF5	5	45/5	0/332	760	3/1	0/31
CLF5	14	39/5	0/635	98	8/6	0/94
CLF5	14	24/3	0/491	582	2/3	0/44
CLF5	4	27/5	0/218	768	4/5	1/1

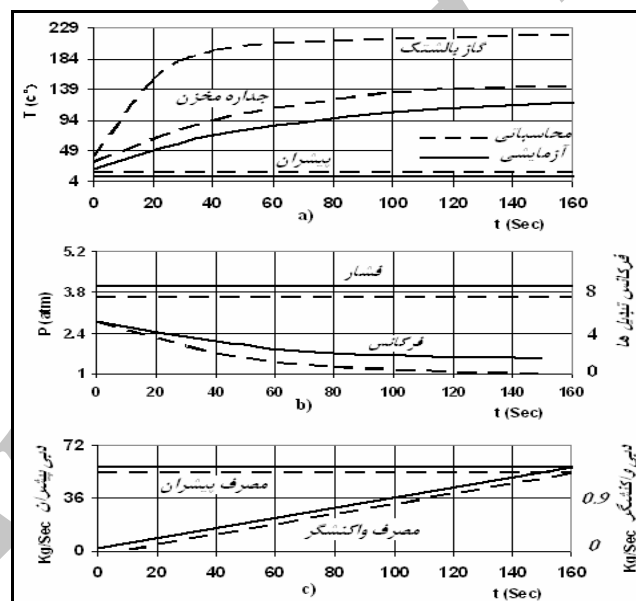
در این تست دی‌متیل‌هیدرازین نامتقارن (UDMH) به عنوان واکنشگر وارد مخزن می‌گردد. فشار در مخزن تا رسیدن به فشار تنظیم رله 5 (شکل 1 و 2) افزایش پیدا می‌کند سپس فرمان قطع صادر می‌شود. با کاهش فشار تا فشار کمتر از تنظیم فشار رله 5، شیر الکترو هیدرولیکی دوباره باز می‌شود و بدین ترتیب دمش ادامه می‌یابد. در کل نتایج تست‌ها حاکی از این است که دمش سطحی برای N_2O_4 و A-50 از مشخصه‌های مطلوبی برخوردار است. نمودارهای مربوط به تغییر مشخصات

اصلی سیستم دمش پالسی شیمیایی در شکل 9 نشان داده شده است. مصرف پیشران مخزن برابر با 47/2 L/s است و طول مدت آزمایش 150 ثانیه می‌باشد. مشاهده می‌شود که در فشار، در باند کنترلی $\pm 0/05$ atm ثابت نگه داشته شده است.



شکل 8- تغییر فشار و دمای جداره مخزن در دمش پالسی:

1- فشار گاز 2-دمای جداره مخزن [5]



شکل 9- مشخصات سیستم دمش مخزن اکسنده در مقیاس طبیعی در دمش شیمیایی پالسی a: مشخصات دمایی، b: فشار مخزن و روند تغییر فرکانس شیر الکترو هیدرولیکی، c: روند مصرف پیشران از مخزن و دبی واکنشگر [5]

6- نتیجه گیری

در این گزارش انواع پاشش بررسی شد و به این نتیجه رسیدیم که برای سوخت و اکسنده موجود (N_2O_4 و $UDMH$) پاشش سطحی کارآمدتر از پاشش زیرسطحی می‌باشد. سادگی مکانیزم دمش و کاهش وزن پروازی نیز از دیگر مزایای به کارگیری سیستم دمش شیمیایی می‌باشد. در این پژوهش امکان استفاده از این سیستم در صنعت حاضر کشور برای هر کدام از روش‌های ذکر شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله گویای این مطلب می‌باشند که با اندکی تغییر در فرم و ساختار مخازن کنونی می‌توان این تکنولوژی را در صنعت کشور به کار برد. در خاتمه این سیستم در ابعاد واقعی روی انواع

موشک‌های هوا به زمین و گروه PLM به کار گرفته شده است. معروف‌ترین پرتابگرهایی که از دمش شیمیایی استفاده کرده‌اند، موشک تیتان II (Titan II) را می‌توان نام برد.

مراجع

- 1- Pressurization System for Liquid Rockets, NASA space vehicle design criteria (Chemical Propulsion), October 1975 .
- 2- محسنی، مهدی، مدل سازی و تحلیل ترمودینامیکی سیستم فشار گذاری مخازن یک موشک سوخت مایع، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، شهریور 1384 .
- 3- Richard J. Kenny and Paul A. Friedman. "Chemical Pressurization of Hypergolic Liquid Propellants". Martin_Marietta Company, Denver, colo.1968.
- 4- قنادی. مهدی، تحلیل سیستم دمش مخازن با استفاده از محصولات احتراق مولد گاز در موشک‌های سوخت مایع، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، بهار 1385 .
- 5- Kalesnikov ,K.S. , "Pressurization system in liquid rocket Engine", Mashinostoroenie Publishing co. (in Russain)
- 6- Sonntag R. E., Borgnakke C., Van Wylen G. J., Fundamentals of Thermodynamics, Sixth Edition, John Wiley & Sons Inc. 2003 .
- 7- Huzel D. K. and Huang D. H., Modern Engineering for Design of Liquid Propellant Rocket Engines, Second Printing, AIAA 1992 .
- 8- Beliyaf N. M., Pressurization system design for liquid rocket, Mashinostroenieh, Moscow 1976 .

Archive of SID